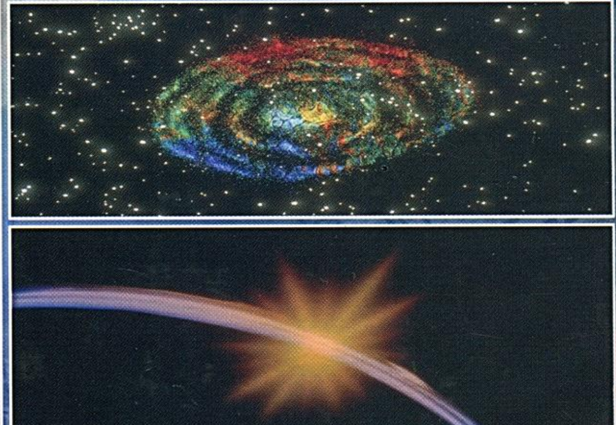


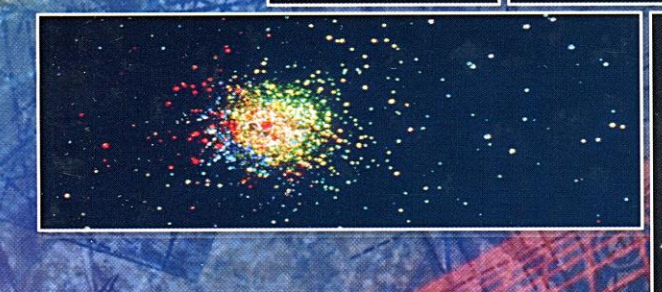
أعاجيب الكون السبع



تعريب وتعليق

الدكتور داود سلمان السعدي







علي مولا





أعاجيب
الكون السبع

إسم الكتاب:
أعاجيب الكون السبع

تعريب وتعليق:
د. داود سلمان السعدي

الناشر:
دار الحرف العربي
للطباعة والنشر والتوزيع
زقاق البلاط - بناية فخر الدين
تلفون وفاكس: ٣٦١٠٤٥ / ٠٠٩٦١١
بيروت - لبنان

الطبعة:
الأولى

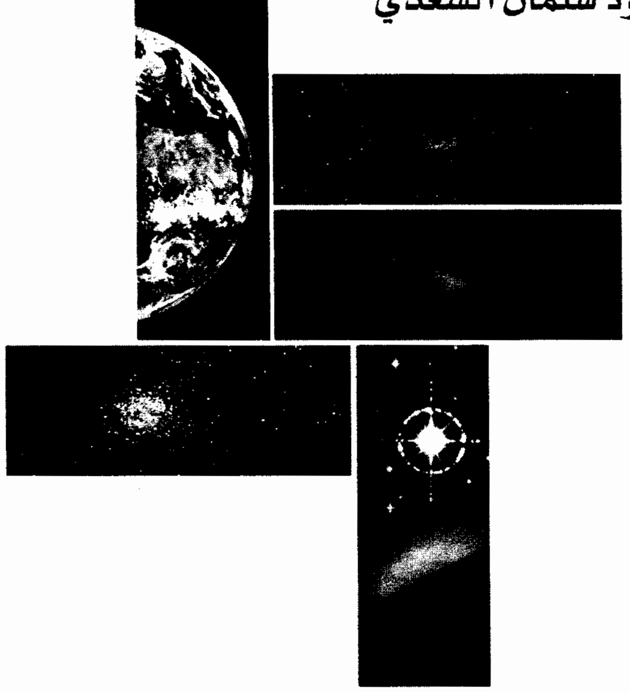
تنفيذ الغلاف:
فواد سليمان وهبي

الترقيم الدولي:
9953449-18-X
E-Mail:dar-al-haref-alarabi@yahoo.com

أعاجيب الكون السبع

تعريب وتعليق

الدكتور داود سلمان السعدي





الطبعة الأولى



ص. ب: ١١٣/٦٤٨٠
فاكس: ٠٠٩٦١١/٣٦١٠٤٥
بيروت - لبنان

طبع في لبنان Printed In Lebanon

هذا الكتاب

يستدعي هذا الكتابُ، إلى نفسِ القارئ، ذلك الشعورَ برعشة الإثارة لدى رصدِه مظاهر الكون الغريبة والمدهشة. كما أنه يفعم نفسه بالشعور بالرخاء والسعادة اللذين يتملّكانه عند فهمه للكون الذي يحيط به، من خلال العلم الحديث.

ويقودنا الأستاذ نارليكار، في رحلة من الاكتشافات عَبْرَ الكون، باستخدام أمثلة هي غاية في البساطة، ومن خلال الرسوم التوضيحية الغزيرة. وهو يبتدئ بالأرض والمنظومة الشمسية، ثم يرتفع تدريجياً إلى أبعد ما يمكن أن يوصل إليه من الكون. وتمثّل كل واحدة من أعاجيب الكون السبع طيفاً من الظواهر الغامضة، أو طائفة من أحداث مشهودة أو أجرام كونية بارزة، قد تحدَّت الفضولَ البشري، وهي غالباً ما استعصت على التفسير.

وتبدأ الأعجوبة الأولى عندما نُغادر الأرض، فتثار أسئلة مثل: «هل يمكن أن نرى الشمس وهي تشرق من الغرب؟»، أو «هل يمكن أن تكون السماء مظلمة رغم وجود إشعاعات الشمس المتوهجة؟». وتدور الأعجوبة الثانية حول العمالقة والأقزام في عالم النجوم، وكيف تولد النجوم، وتعيش، ثمّ تموت. وأمّا الأعجوبة الثالثة فتدور حول جائحة انفجار النجوم العظيمة، وكيف يمكن أن يقدح موتُ نجمٍ ما شرارةَ تكوُّنِ جيل جديد من النجوم. وأمّا الأعجوبة الرابعة فتدور حول النوابض، وهي تمثّل الذروة من الموقِّتات، أو الساعات، في الكون. وتدور الخامسة حول تأثيرات قوّة الجاذبية الغريبة، وأمّا السادسة فتدور حول أخدوعات المكان، وتبحث الأعجوبة الأخيرة في توسُّع الكون العظيم كلِّه. ثم ننظر، أخيراً، في ألغاز الكون الأخرى التي ظلّت مستعصية على التفسير، ونتكهّن فيما عساها أن تكون الأعجوبة الثامنة.

ويحوكُ المؤلفُ، باستخدامه للغةٍ سهلة واضحة، وأمثلة مسلِّية، نسيجاً لاكتشافاتٍ فلكية مثيرة عُرِفتْ حديثاً، وهي تبيّن لنا كيف أنها تدفع الفلكيين إلى اكتشاف أعاجيب الغد.

وُلِدَ جيانت ڤيشنو نارليكار في كولهابور، في الهند، عام ١٩٣٨، وتخرَّج من جامعة باناراس عام ١٩٥٧، ثم درس الرياضيات في جامعة كامبريدج، وتخرَّج منها بأعلى درجات الشرف، وبميدالية تايسون لعلم الفلك. وتابع عمله في كامبريدج كباحث في مؤسسة فريد هويْل، ومُنح الدكتوراه في العلوم من جامعة كامبريدج.

وأصبح نارليكار زميلاً لكلية الملك، في كامبريدج، عام ١٩٦٣، وعمل في مؤسسة فريد هويْل التي كانت قد تأسست حديثاً، عام ١٩٦٦، لدراسات علم الفلك النظري في كامبريدج. وعاد إلى الهند عام ١٩٧١ ليعمل في مؤسسة تاتا للبحوث الأساسية، أستاذاً للفيزياء الفلكية. ثم انتقل إلى بيون، عام ١٩٨٩، لتأسيس المركز البينيّ لجامعات علم الفلك والفيزياء الفلكية.

ولقد حصلَ نارليكار على شهرةٍ عالميةٍ لبحوثه على الجاذبيةِ وعلم الفلك، ولطالما انحازَ إلى رأيِ الأقلية في بعضِ المجادلاتِ الرئيسية. وهو معروفٌ بعملَه على نشرِ العلم على نطاقٍ واسع في المجتمع، وكمتحدّث في المواضيع العلمية. وله مؤلفاتٌ واسعةٌ عديدةٌ حازتْ علَى الشعبيةِ والشّهرة، وهي تشهدُ له بالباعِ الطويلِ، كما أنه يتمتَّعُ بكتاباتِ الخيالِ العلميِّ باعتبارها ضرباً مِن ضروبِ الانطلاقِ على السجيّة.

مُقدّمةُ المؤلف

نَشَأتْ فكرةُ كتابةِ هذا الكتابِ مِن محاضراتي، في علم الفلكِ، للجمهور. ولقد وجدتُ دائماً أنّ الناسَ يُقبلون كثيراً علىٰ المعلوماتِ الكونيةِ، شريطةَ أن تُقدَّم إليهم علىٰ شكلِ غيرِ تقنيّ، ما أمكنَ ذلك. وإنّي لَيغمرُني، عندَ تقديمي لأعاجيبِ الكونِ السبعِ إلىٰ القارئِ العامّ، إحساسي بهذهِ الحاجة.

وقد يكونُ اختياري للأعاجيبِ السبعِ، وترتيبِها الذي جاءت به، مُحتاجاً إلى بعضِ التفسير. فلقد ابتدأتُ الرِّحلةَ الكونيةَ مِن الأرضِ والمنظومةِ الشمسية، واتجهتُ بصورةٍ مُطّرَدةٍ نحو الخارج. إنّ كلَّ أُعجوبةٍ منها ليست موضوعاً منفصلاً، ولكنها مِساحةٌ لِموضوع.

وهكذا تتناولُ الأُعجوبةُ الأولىٰ بعضَ الظواهرِ غيرِ المتوقعةِ التي نواجهُها حالَ مغادرتنا لتُخومِ الأرضِ الضيّقة. وتلي ذلك الأُعجوبةُ الثانيةُ، حولَ نشوءِ النجومِ التي هي أكثرُ شيءٍ وجوداً في السماء، مِمَّا تراهُ العينُ المجرّدة. وأمَّا الأُعجوبةُ الثالثةُ فهي تدورُ حولَ النجومِ المتفجّرة، والرابعةُ حولَ ما يتبقّىٰ بعدَ تلكَ الانفجارات.

وتُبيِّنُ الأُعجوبةُ الخامسةُ دَوْرَ الجاذبيةِ التي تتزايدُ سَطْوَتُها كلما واجهْنا أجراماً أعظمَ وأعظم، كالثقوبِ السوداء، والكوازاراتِ، والنوىٰ الفعّالةِ للمجرّات. وتُنبئُنا الأُعجوبةُ السادسةُ عن الحِيَلِ الغريبةِ التي قد تقومُ بها الطبيعةُ في خداعِ الفلكيِّ، مِن خلالِ تسبيبها لحدوثِ أوهامٍ علىٰ مقاييسَ عظيمة.

وأمَّا الأُعجوبةُ السابعةُ فهي الكونُ المتوسِّعُ، ومُحاولاتُ العالِم الفلكيِّ تجميعَ أجزاءِ صورةِ تاريخِ الكون، والتوقّعاتُ التي تخصُّ مستقبلَه. فهل إنّ الكونَ قد بدأ بالانفجارِ الكبير Big bang؟ وهل إنّه سوفَ يضمحِلّ إلىٰ لا شيءَ أم إنّه سوفَ ينتهي بانسحاقٍ

عظيم Big crunch؟ لَسَوْفَ نَعْرِضُ بعضَ الحقائقِ والتوقعاتِ حول ذلك كلِّه.

وعلىٰ الرغم مِن أنَّ مُقدَّمةَ الكتابِ تُعَدِّدُ بعضاً مِن الألغازِ التي لم يتَسَنَّ حَلُّها بعدُ، فإنَّ أعظمَ أُعجوبةٍ تتمثّلُ، بالنسبةِ إليَّ، في النجاحِ الذي حقَّقَتْهُ الطُرُقُ العلميةُ في التعاملِ مع الألغازِ الكونية. ولماذا يتوجّبُ أن تنطبقَ القوانينُ العلميةُ التي اكتُشفتْ علىٰ مدىٰ ثلاثةِ قرونٍ، في هذا الكوكبِ الضئيل، علىٰ تاريخ يتألّفُ مِن بلايينِ السنين، في عالَم هائل؟ ولكنَّ الحقيقةَ المثيرةَ هي أنها تنطبقُ فَعلاً[1]. وإنني لآمُلُ أن يشاركني القارئُ، مِن خلالِ هذا الكتاب، هِزَّةَ النفسِ مِن ذلك.

وأتوجَّهُ بالشكر إلىٰ آدم بلاك، من دارِ جامعةِ كامبريدج للنشر، لتشجيعهِ إيّايَ علىٰ تأليفِ هذا الكتاب، وإلىٰ المحكّمين الثلاثةِ مجهولي الاسمِ، لاقتراحاتهم البنّاءةِ حولَ شكلِ الكتابِ ومحتوياته، وسانتوش خاديلكار، ورام أبهيانكار، وپريم كومار، لمعاونتهم إيّايَ علىٰ تحضيرِ مُسَوَّداتِ هذا الكتابِ ورسومهِ التوضيحية، وزوجتي مانغالا التي قامت بدور قارئِ الكتاب، كما أشكرُ سوماك رايكو دوري لمساعدته لي في الحصول علىٰ بعض الصورِ الحديثةِ لهذا الكتاب.

جايانت ڤي نارليكار
المركزُ البيني للجامعات لعلومِ الفَلَكِ والفيزياءِ الفلكية
پيون

(١) القوانينُ الكونيةُ هِيَ هي في كلِّ مكانٍ من الكون، لأن خالقها واحد. د.س

مقدمة المترجم

حقاً إن العلم لَيهدي إلى الإيمان.

كما أن الجهل لَيُفضي إلى الكفر.

وآيات الخالق سبحانه، في خَلْق الكون، كما في خلق الإنسان، هي ما لا يُعَدُّ. وكلّ ما في الكون لهو آيات تنطق بخالقها سبحانه، وهي تستحثّنا على أن ننظر فنتفكّر فيما قد خلقه الباري سبحانه، وفي عظيم مِننه، وكريم آلائه. وعَمِيَتْ عينٌ لم ترَ عظمة الخَلْق والجمال والنظام الذي يلفُّ كلَّ ما في الكون. وأن نعرف المزيد عن عظمة الكون وروعته فذلك مِعوان يهدينا، لا ريب، إلى الإيمان بخالق كلّ شيء وبديعه.

وقد تناول مؤلّف هذا الكتاب، من روائع الخَلْق، ما هو جَمَعَه تحت سبعة عناوين، وأسماها بالأعجوبات، وأسمى كتابه بأعاجيب الكون السبع. وهو قد غاص في بحر علم الفلك الحديث ثم خرج علينا من دُرَرِه بحقائق كثيرة قد لا يكون الكثير منها معروفاً للقارئ العام. وهو لم يجئ بتلك الأعاجيب السبع، وهي كذلك فعلاً، إلاّ ليستدرجنا بها لإثارة فضولنا وتشوُّقنا حتى نعرف المزيد عن هذه المواضيع التي تفتح أفهامنا على حقائق، وأسرار، وألغاز، لكونٍ لا نشغل منه، ولا نعرف، رغم أننا في اللّب منه، إلاّ أقلَّ القليل!

ورغم دقة الكثير من المواضيع التي تناولها، بل ووعورتها، فلقد نجح المؤلف في عرض حقائقها للقارئ في شكلٍ مبسَّط. وهو تناول بالبحث أصل الكون ونشأته، ثم احتضار النجوم التي هي البنى التي يتكون منها الكون. كما بحث النظرية الفيزيائية التقليدية (أي النيوتنية)، ونظرية النسبية الخاصة، ونظرية النسبية العامّة لآينشتاين، مُحَلِّياً حقائقها بالشرح المبسَّط، وغير ذلك كثير.

ويتميز الكتاب، فوق ذلك، بميزات منها أن كاتبه عالِمٌ فلكي بارز، وهو اختار أن يكتب، فوق كتبه المتخصّصة، مؤلفات قصَدَ منها القارئ العام، كما أن الكتاب حديث في معلوماته وفي تأليفه. وبينما هو يبسِّط مواضيعه إلى أقصى حدّ، فإنه لا يستغني عن الضبط والدقة العلمية التي يتحلّى بها العلماء.

وآيات مبدع الكون وخالقه هي ما لا يُحصى، ولكن القليل من الكتب الفلكية في الغرب ما قد يُذكِّر بها، وأكثرها ما هو قد يتنكَّر لها، لا بل إن بعضها يجهرُ بالإلحاد ويدعو له. والأدهى من ذلك أن ما يُترجَم منها إلى العربية يكاد أن يكون كلُّه أو جُلُّه وقفاً على الأخير، فكأن القائمين على نقل هذه العلوم لم يجدوا ضالَّتهم إلاّ في كتابات الملحدين من كتّاب الغرب، رغم أن ثمة، اليوم، صحوةً إيمانية قويّة. وأعجَبُ ما تجده عن الكثير من الكتب الغربية التي تبيّن آيات الله تعالى، وتدعو إلى الإيمان به سبحانه، أنها لم تنعكس على ما نترجمه منها إلى لغتنا العربية، فكأننا صرنا لا نترجم من كتبهم تلك إلا ما هو ضدّ الدين والإيمان، ولَكأنّ الكثير من علماء الغرب هم أكثر تواضعاً للعلم، وأقرب إلى الإيمان، وأصرف إلى الحقيقة المجرّدة، من نظرائهم العرب، وجُلُّ الأخيرين ليس لهم من الأمر شيءُ اللهم إلاّ اختيار العناوين التي يصار إلى ترجمتها، فكأن تلك الكتب المترجمة صارت، من حيث لا يُشْعَر أو يُراد بها، إذا أردنا أن نكون حسني النية، سبباً للشك لا لليقين، وللكفر لا للهداية، ومصدراً يَحُضُّ على الابتعاد عن الدين المبني على العلم الحق، بدلاً من أن تكون سبباً للهداية للإيمان.

هذا بينما لا يَعسر على القارئ الغربي أن يجد الكثير من كتب جهابذة علمائه على رفوف المكتبات، مما يتناول أسرار الكون التي حيَّرت ألبابَ العلماء، وروائع الخلق التي طالما أذهلت المخلوقين. ولا عجب ولا غرابة في أن ينحو المزيد من العلماء في الغرب هذا المنحى، بعد أن صارت تكشف لهم، شيئاً فشيئاً، ورويداً رويداً، بعض الحجب الكثيفة التي قد أحاطت بكلّ ما في الوجود.

هذا، وفي الناس، ونحن منهم، تعطّش إلى الإيمان الخالص المبني على العلم كبيرٌ، وظمأ إلى المعرفة الروحية في هجير العصر المادي الماحل الذي يَلُفُّنا عميقٌ.

ولم يَدَّخر المترجم وسعه حتى يجيء هذا الكتاب بعبارةٍ سلسة سهلة، وتوخّى الدقة والضبط الشديدين، حتى يجيء على أحسن شكل، فأعاد النظر في ترجمته وصياغته مراراً، ليصير على أجمل صورة، وأشْكَلَ كلماته، حتى يقرب مأخذه، ويسوغ مذاقه،

ولا يقبل لبساً ولا غموضاً، فَتَتِمَّ الفائدة المتوخاة منه. كما أنه أضاف شروحات وتعليقات حيثما اقتضى الأمر.

ألا ما أحسن العلم، ذلك الذي يكون مقروناً بالإيمان، وما أتعس ما قد نظنّه علماً ذلك الذي يُضِلُّك عن سبيل الإيمان اللاحب، وما هو بالعلم الحقّ.

ولا بد من أن نَذْكُر أخيراً، تسجيلاً للحقيقة، بأن مؤلف الكتاب، إذ هو ذَكَر آيات الخَلْق ونسِي أن يُشيرَ إلى خالقها، فإنّه لم يُجاهِر بما هو ضدَّ الإيمان، فكلُّ ما تراه من إشارة إلى الآيات الكونية التي تعلن عن خَلْقِ الخالق إنَّما هي من إضافة المترجم لا الكاتبِ الأصليّ.

الشارقة
١٢ ربيع الأول ١٤٢٥ هـ
١ مايس ٢٠٠٤ م

الدكتور
داود سلمان السعدي

تمهيد

يطمحُ هذا الكتابُ إلىٰ إعطائِنا لَمَحاتٍ سريعةً عن الحقولِ المثيرة، حاليّاً، في عِلْمَيِّ الفَلَكِ والفيزياءِ الفلكية.

و«الأعاجيبُ» السبعُ الموصوفةُ هنا ليست مواضيعَ منفصلةً عن بعضها البعض، ولكنها تُمثِّلُ طيفاً من الظواهرِ المجهولة، أو طائفةً مِن أحداثٍ مثيرة، أو ثُلَّةً من أجرامٍ كونية رائعةٍ وغيرِ عادية. ولقد طَرَحَتْ محاولاتُ فَهْمِ هذه الأجرامِ تحدّياتٍ عظيمةً لحُبِّ الاستطلاعِ والذكاء البشريّيْن.

ورغم أنّ هناك خيطاً واحداً ينتظمُ هذه الأعاجيبَ السبعَ كلَّها، فإنَّ كلاً منها يمكنُ أن يُقرَأَ بصورةٍ منفصلة.

وإنني لآمُلُ مِن خلالِ هذه الأعاجيبِ أن يتشاركَ القارئُ الشعورَ بالإِثارةِ، لدىٰ استكشافِ الكون، مع علماءِ الفَلَكِ المتخصِّصين، الذين يَرْصُدونَ الظواهرَ الفلكية ثم يضعونَ النظرياتِ حولها.



الأعجوبة (١)

مغادرةُ اليابسة
عندما رأيتُ الشمسَ تشرقُ مِن الغرب

كان ذلك في يومِ شتويٍّ مِن عامِ ١٩٦٣، وفي ١٤ مِن كانونِ الأولِ منه، علىٰ وجهِ التحديد، عندما رأيتُ الشمسَ تشرقُ مِن الغرب.

كلاّ، فلستُ مازحاً، فلقد حدثَ هذا الأمرُ، فعلاً، وكما قُلتُ تماماً. ولكن حتَّىٰ نحتفظَ بمصداقيةِ هذا القولِ فلا بُدّ مِن أن أتوسَّع في ذكرِ الظروفِ التي حدثَ فيها ذلكَ. وها هي القصّةُ بالتفصيل..

لقد حَدَثَ ذلكَ عندما كنتُ في رِحلةٍ للخطوطِ الجويةِ البريطانية، مُتّجهاً من مطارِ هيثرو نحو شيكاغو. كنتُ أجلسُ قُبالةَ نافذةِ الطائرة، وهي مِن طرازِ بوينغ ٧٠٧، وكان يجلسُ قُبالتي الفلكيُّ ديفد ديُو هيرست، وهو يعملُ في مرصدِ جامعةِ كامبريدج، وكان كلٌّ منّا مُتّجهاً إلىٰ مدينةِ دالاس، في تكساس، لحضورِ مؤتمرٍ عالميٍّ حول الانكماشِ الجاذبيّ والفيزيائياتِ الكونيةِ النسبية.

كانت السماءُ صحواً، بالطبع، فوقَ ثلاثينَ ألفَ قدمٍ، وكنتُ أنظرُ عَبْرَ النافذةِ إلىٰ اللّونِ القرمزيّ في الأفق الجنوبيّ الغربي، فرأيتُ الشمس وهي تغربُ وتتوارىٰ تحتَ الأفق. كان نُعاسُ ما بعد الغداءِ قد أخذَ طريقَهُ إليَّ، وكنتُ علىٰ وَشْكِ أن أغفوَ قليلاً لآخُذَ سِنَةً مِن النوم، عندما انطلقَ ديفد ديو هيرست بالكلام، فجأةً: «أنظرْ، إنَّ الشمسَ تُشرِقُ من جديد. إنني لمتأكّدٌ مِن أنني قد رأيتُها وهي تتوارىٰ تحت الأفقِ، قبل دقائقَ قليلة». ولكنْ حتىٰ طريقتهُ في الكلام، والتي دَلّت علىٰ واقعِ مُعاشٍ بصورةٍ طبيعية، دَلّتْ علىٰ إثارةٍ مكظومة.

وألقيتُ بنظري من خلالِ النافذة. لقد كانت الشمسُ ترتفعُ هناك، حقّاً وصدقاً، في الأفقِ الجنوبيِّ الغربيّ. وعندما كان كلٌّ منا مشغولاً بمراقبتها في الدقائقِ القليلةِ التالية، فلقد ارتفعَتْ أكثرَ مِن ذلك، وبصورةٍ ملحوظة. ولكنَّ هذا المشهدَ الفريدَ لم يَدُمْ طويلاً، فلقد توقَّفَتْ حركةُ الشمس، ثم هي انحدرتْ تحت الأفقِ أخيراً، عندما حوَّلتِ الطائرةُ اتجاهَها نحو الجنوب. وكانت الدنيا صارتْ مُظلمةً تماماً، عندما كنّا نهبطُ إلىٰ مِنطقةِ مطارِ أوهير.

كان ذلك هو المنظرُ الفريدُ الذي شَهِدْتُهُ أنا وديفد ديو هيرست، وهو ما لن أنساه أبداً.

لماذا بزغتِ الشمسُ مِن الغرب؟

لا يحتاج الجوابُ علىٰ هذا السؤالِ إلىٰ مُعجزاتٍ، ولا إلىٰ أخاديعَ أو أوهام بصرية. لقد كان ذلك المنظرُ الذي شهدناه حَدَثاً حقيقياً وطبيعياً جدّاً، وله تفسيرٌ منطقيٌّ تماماً. ويُبيِّنُ لنا هذا المثالُ كيف يمكن أن تكون أحاسيسُنا حالَ مغادرتِنا لأُمِّنا الأرض.

فلنحاولْ أن نفهمَ أوّلاً لماذا نرىٰ الشمسَ وهي تبزُغُ، في كلِّ يوم، مِن المشرقِ، وتغيبُ مِن المغرب. أو لماذا تتحركُ النجومُ، عَبْرَ السَّماءِ، مِن شرقٍ لَغرب. إنَّ تلميذَ المدرسةِ الابتدائية يعرفُ، اليومَ، سببَ ذلك، وهو أنّ الأرضَ تلُفُّ حولَ محورِها الشماليِّ الجنوبيّ. وإذا ما نظَرْنا مِن هذه المِنَصَّةِ المتحركةِ، أي الأرضِ، فستبدو لنا السماءُ المُرَصَّعةُ بالنجوم وهي تدور بالاتجاهِ المعاكس. وهذا يشبهُ الطريقةَ التي يرىٰ بها الراكبُ في الطريقِ الدائريِّ الأشجارَ والبيوتَ المحيطةَ به وهي تدورُ حولَه بالضبط. وحتىٰ نرىٰ الشمسَ والنجوم، وهي تتحركُ مِن الشرقِ إلىٰ الغرب، فإنّ الأرضَ ذاتَها لا بدَّ أن تكون دُوّامةً عظيمةً تلفُّ حول نفسِها مِن غربٍ لشرق.

يا له مِن أمرٍ بسيط! فبمساعدة كُرَةٍ صغيرة يمكنُ لأيِّ أمرِىءٍ أن يفهمَ هذه الفَرْضيةَ، ولكنه أمرٌ استغرقَ مِن الجنسِ البشريِّ آلافاً مِن السنينِ حتىٰ يتقبّلوهُ، باعتباره تفسيراً حقيقياً. فلنبتعدْ قليلاً، ولنُلْقِ نظرةً خاطفةً علىٰ التاريخ المكتوب.

«ولكنّ الأرضَ تدورُ فعلاً» Eppur si muove:

اعتقدَ الإغريقُ، قبلَ أكثر مِن ألفيِّ عام، وهم كانوا يمتلكونَ أكثرَ الحضاراتِ تقدّماً في أوروبا، بأنّ الأرضَ ثابتةٌ لا تتحركُ، وأنّ الكونَ هو الذي يدورُ حولها، وأنّه أشبهُ شيءٍ بكُرةٍ مجوَّفةٍ تلتصقُ بها النجومُ، وتوجَدُ الأرضُ في مركزِها. ولقد افترضوا أيضاً

بأنّ الشمسَ والكواكبَ (السّيارةَ) تدورُ حول الأرض، ولكنْ علىٰ مسافاتٍ أقربَ إلينا مِن النجوم.

إنّ تفحُّصاً بسيطاً لِخبرتِنا المُعاشةِ يُنبئنا بأنّ هذا الاعتقادَ يبدو معقولاً تماماً. ويُرينا الشكلُ ١,١ مساراتٍ مُنحنيةً للنجوم، صَوَّرَتْها آلةُ تصويرٍ ظلّتْ عدستُها مفتوحةً للتصويرِ طيلةَ الليل. ونُلاحِظُ بأنه لو تمَّ رصدُ نجمٍ نموذجيٍّ في أيِّ وقتٍ فإنه سيبدو مَصدراً



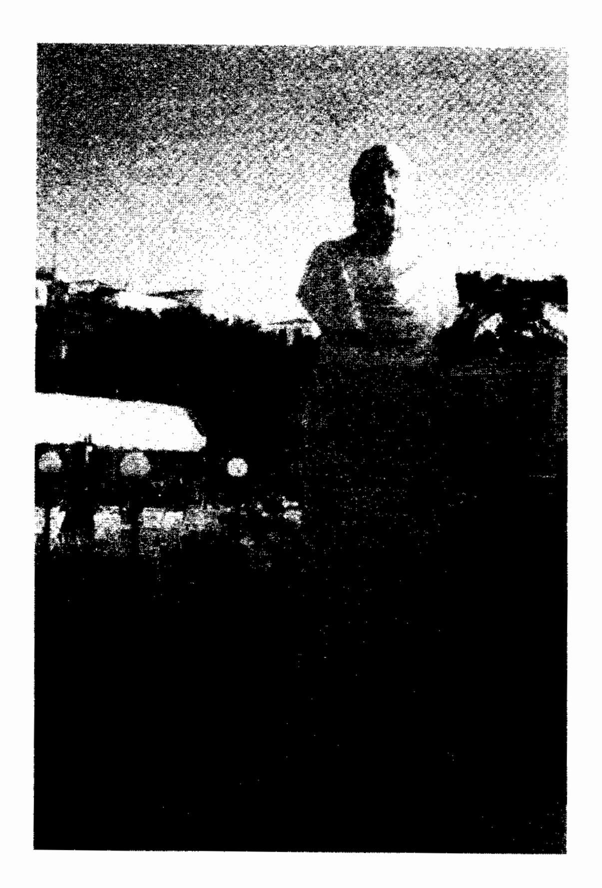
الشكل ١,١ : المساراتُ الدائرية للنجوم، في نصف الكرة الجنوبيّ، مُصوَّرةً علىٰ خلفيةٍ للمِرقاب telescope الأنغلو ـ أسترالي. ولو كان هناك نجمٌ قطبيٌّ في الجنوب، لبدا علىٰ شكلِ نقطةٍ في مركزِ هذه الأقواسِ النجمية (تصوير ديفد مالين، المرصد الأنغلو ـ أسترالي).

للضوء علىٰ شكلِ نقطة. ويتغيّرُ موقعُ النجم ببطءٍ، وهذا ما لا نكادُ أن نَحِسَّ به لو نحنُ وقفْنا وراقبناهُ لمدّةٍ دقائقَ قليلةٍ وحَسْب. أمّا إذا نظرْنا إليه بعدَ ساعتينِ مثلاً فإنَّه سوف يكونُ قد تزحزحَ عن موقعِه، ومعه بقيّةُ النجوم. لقد التقطَتْ آلةُ التصوير، في الشكل ١,١ ، التغيّرَ المستمرَ في موقعِ كلِّ نجم بحيث أننا نرىٰ مَسارَ النجمِ الدائريَّ بدلاً مِن أن نراه مصدراً علىٰ شكلِ نقطة. ولنقارنْ هذا الشكلَ، مثلاً، بالشكلَ ١,٢ الذي يلتقطُ صورةَ أضوية السياراتِ الأمامية، بينما هي تسيرُ في مدينةٍ مزدحمة. وكذلك فإننا نرىٰ الشمسَ، وهي تسيرُ نهاراً، في مَسارٍ دائريٍّ مِن الشرقِ إلىٰ الغرب، ولكنها أسطعُ مِن أن تلتقطَها عدسةٌ لآلةِ تصوير! وهكذا، فلقد كان مِن الطبيعيِّ تماماً، بالنسبةِ إلىٰ راصدٍ علىٰ الأرضِ، افتراضُ أنّ الأرضَ ثابتةٌ لا تتحركُ، وأنّ الكونَ كلَّهُ يدور.

ولكنَّ مفكّراً واحداً فَكَّر بطريقةٍ تختلفُ عن ذلك. فلقد جادَلَ المفكّرُ الإغريقيّ أريستاركوس الساموسي (حوالىٰ ٣١٠ ـ ٢٣٠ق.م) بأنّ مِن الممكنِ أن نفهمَ هذه الملاحظاتِ بطريقةٍ أبسط، بافتراضِ أنّ الأرضَ هي التي تلفُّ مِن الغربِ إلىٰ الشرق، وأنّ الكونَ لا يدورُ حقيقةً. واعتقَد أريستاركوس أيضاً، وقد فُقِدَتْ كتاباتُه مع تدميرِ مكتبةِ الإسكندريةِ الشهيرة، بأنّ الأرضَ هي التي تدورُ حول الشمس، وليس العكسُ



الشكل ١,٢ : تُرينا أضويةُ مقدّمةِ السياراتِ مساراتٍ مستقيمةً، في طريقٍ عامٍّ مزدحم (قارنْ مع المساراتِ النجميةِ في الشكل ١,١).



الشكل ١,٣ : أريستاركوس الساموسي.

(انظُر الشكل ١,٣). ولكنَّ أفكارَه لم تَجِدْ مَن يتقبَّلُها إلاَّ القليلَ، ولأسبابٍ وجيهةٍ أيضاً. فَلْنَرَ السببَ في ذلك.

خُذ، أوّلاً، مثالَ الدُّوامةِ الدوارة. إنَّ شخصاً يقفُ عليها سيشعرُ بقوةٍ تتجهُ إلىٰ الخارجِ وتنحو إلىٰ دفعِه بعيداً عن مركزِ الدُّوامة. إنه التأثيرُ ذاتُه الذي نشعرُ به عندما نركبُ سيّارةً تدورُ حول منحنىً، في سرعةٍ كبيرة، إذ إننا نُرمىٰ بعيداً عن مركزِ الاستدارة، وهكذا، فلو كنّا واقفينَ علىٰ أرضٍ تدورُ حول نفسِها، فلماذا لا نُرمىٰ بعيداً عن محورِ دورانِها؟ لم يكنْ مِن الممكنِ الإجابَةُ علىٰ هذا السؤالِ في زمنِ أريستاركوس.

ولننظرْ، ثانياً، إلىٰ ما يحدثُ في التجربةِ البسيطةِ التالية، في ميدانٍ ما. اُنظُرْ إلىٰ الشجرةِ مِن علىٰ مسافةِ ٥٠ متراً، مثلاً، ثم امشِ الآن حوالىٰ عشرة أمتارٍ علىٰ جانبيّ الاتجاهِ الأصليّ وانظُرْ إليها مجدّداً، فلسوف يبدو اتجاهُها، بالنسبةِ إلىٰ خلفيةِ الأشجارِ الأخرىٰ الأبعد، وقد تغيّر. وهكذا فلو نظرْنا، اليومَ، إلىٰ نجمٍ ما، ثم نظرْنا له بَعْدَ ستةِ

أشهرٍ، فلسوف يبدو اتجاهُه وقد تغيَّر بالنسبةِ إلىٰ خلفيةِ النجومِ الأبعدِ، **إذا كانت الأرضُ قد تحركتْ خلالَ الستةِ الأشهرِ هذه مِن موقعها الأول**. ولقد توقَّع أريستاركوس هذه النتيجةَ فعلاً، وحتىٰ يُقيمَ الدليلَ علىٰ فرْضيتِه، فلقد حاول أن يبحثَ عنها، ولكنْ مِن دونِ أن يتمكنَ مِن إيجادِها.

وهكذا، وبالنسبةِ إلىٰ أيٍّ مِن الاحتمالَيْنِ، فلقد فشلتْ فرضيةُ أريستاركوس. ولكننا نعلمُ اليومَ أنه كان، ورغمَ كلِّ الاعتراضاتِ، مُصيباً حقّاً. إنَّ السببَ في عدمِ رَمْينا بعيداً عن الأرضِ الدَّوارةِ حول نفسِها هو أنَّ مقدارَ هذه القوّةِ صَغيرٌ جداً بالمقارنةِ مع جذبِ الأرضِ لنا كلِّنا، وهي قوةُ الجاذبيةِ الأرضية pull of gravity. وبسببِ قوةِ الجاذبيةِ الأرضيةِ فإنّنا مرتبطونَ بسطحِ الأرضِ، ولو حاولْنا أن نقفزَ إلىٰ الأعلىٰ بعيداً عنها، فإننا نعودُ إليها. إنها القوةُ التي تجعلُنا «نشعرُ بأوزانِنا». وبالمقارنةِ مع قوةِ الجاذبيةِ، فإنّ القوةَ الناجمةَ عن دورانِ الأرضِ حولَ نفسِها، والتي تنحو إلىٰ طَرْحِنا بعيداً عنها، لا تكادُ أن تكونَ شيئاً مذكوراً، لأنها لا تصلُ إلاَّ إلىٰ حوالىٰ ٣ أجزاءٍ مِن ألفِ جزءٍ منها، عندَ خطِّ الاستواء، بل وأقلَّ مِن ذلك في خطوطِ العَرضِ الأعلىٰ.

أمَّا فِيما يخصُّ التأثيرَ الثاني، فلقد قَدَّر أريستاركوس بُعْدَ الأجرامِ النجميةِ بأقلَّ مِن حقيقتِه بكثير، وكانت تقديراتُه بالنسبةِ إلى التغيُّراتِ المتوقعةِ في اتجاهاتِ النجمِ أكبرَ مِن التغيّراتِ الحقيقيةِ بكثيرٍ (وإننا لنعلمُ، مِن المَثَلِ الذي ضربناهُ، بالنظرِ إلىٰ الأشجارِ مِن مواقعَ مختلفةٍ، بأنَّ اتجاهَ شجرةٍ ما بعيدةٍ لا يكادُ يتغيّرُ عندما نغيّرُ موقعَ مشاهدتِنا له، بينما يتغيّرُ اتجاهُ الشجرةِ القريبةِ بصورةٍ ملحوظة). وهكذا فإنَّ اتجاهَ النجمِ يتغيرُ، بالفعل، إذا ما رصدناهُ بَعْدَ ستةِ أشهرٍ، ولكنْ ليس قريباً ممَّا توقعَهُ أريستاركوسُ أبداً. لقد كانت التغيّراتُ الفعليةُ، في اتجاهاتِ النجوم، أصغرَ بكثيرٍ مِن أن يمكنَ قياسُها مِن خلالِ النظرِ بالعينِ المجرّدةِ البحتةِ مِمَّا كان متوفراً في زمانه.

ويُعرَفُ اليومَ الأثرُ الذي كان يَتوقَّعُ أريستاركوسُ رؤيتَه **باختلاف المنظرِ Parallax**، ويمكنُ قياسُ اختلافِ منظرِ النجومِ القريبةِ نسبياً بمساعدةِ المَراقِبِ الحديثة.

ولقد تمَّ إجراءُ أوّلِ قياساتٍ لاختلافِ مَناظرِ النجومِ مِن قِبَل الفلكيِّ الألمانيِّ فريدرك وِلْهَلْم بازيل، في عامِ ١٨٤٨، علىٰ النجمِ المعروفِ باسم ٦١ سيغني «61 Cygni»، بعدَ أكثر مِن ألفيِّ عام مِن زمنِ أريستاركوس! وكم كان صِغَرُ التغيّرِ الملحوظِ في الاتجاه؟ لو استخدمْنا الدرجةَ الاعتياديةَ، باعتبارِها مقياساً للزاويةِ، فإنّ التغيّرَ الملحوظَ سيكونُ نحواً

مِن جزءٍ مِن **ألفِ جزءٍ مِن الدرجة!** ولقد كان ذلك فوق قدرةِ قياساتِ الإغريقِ القدماءِ علىٰ أيام أريستاركوس. فلا عَجَبَ إنْ لم يَجِدْ معاصرو أريستاركوسَ تغيّراً في اتجاهِ أيِّ نجم مِمَّا قد توقّعه. وليس مِن النادرِ في تاريخ العِلم أنْ يُواجَهَ عالِمٌ خَرَجَ بفَرْضيةٍ صائبةٍ، ولكنّها ضدُّ الاعتقادِ السائدِ، بالسُّخريةِ أو الإهمالِ، إذا كانت النظريةُ مُتقدّمةً علىٰ زمانها. ومِن السخريةِ أنَّ تلكَ الأفكارَ، عندما يتمُّ التأكّدُ منها وقبولُها في نهايةِ المطافِ، فإنَّ هوِيَّةَ مُوجدِها تكونُ قد فُقِدَتْ في ضبابِ التاريخ.

وهذا ما حدثَ للفلكيِّ الهنديِّ أريابهاتا، الذي عاشَ في القرنِ الخامس، والذي حاولَ أن يفسِّرَ ملاحظةَ الأجرام النجمية التي تتحركُ غرباً، بتشبيهها بقاربٍ يسيرُ في النهر. إنَّ النّوتِيَّ يرىٰ الأجسامَ الثابتةَ علىٰ الضفتيْنِ، وهي تتحركُ إلىٰ الخلفِ مثلما تتمُّ رؤيةُ النجوم الثابتةِ مِن الأرضِ التي تلفُّ حول نفسِها. ورغمَ أنَّ السِّجلاتِ التاريخيةَ غامضةٌ تقريباً، ولكن يبدو أنَّ أريابهاتا قد قادَتْهُ السُّخريةُ إلىٰ خارجِ موطنِه الأصليِّ، بِهار، في شماليِّ الهند، ثمَّ كان عليه أن يهاجرَ، بعد ذلك، إلىٰ الولايةِ الغربيةِ، كوجارات، والتي تَعَيَّنَ عليهِ أن يغادرَها مجدّداً، ليستقرَّ أخيراً في كيرالا، الولايةِ الجنوبية. وليس ذلك وحدَه، بل إنَّ مَن جاءوا بعدَه في القرونِ التاليةِ حاولوا أن يدفعوا بملاحظاتِه تحتَ البساطِ، إمَّا مِن خلالِ اعتبارِها غيرَ أصليةٍ أو مِن خلالِ «إعادةِ فهمِها» تحتَ مسمّياتٍ أكثرَ قبولاً.

ولقد حالت الحواجزُ الثقافيةُ التي كانت موجودةً في أوروبا وآسيا دونَ تَقَبُّل تلك النظرةِ الحديثةِ حتىٰ حُلولِ القرن السابعِ عشر. ولقد اكتسَبَتْ فكرةُ الأرضِ الثابتةِ، في القرونِ الوسطىٰ، مكانةَ العقيدةِ الدينية[1]. وأدَّتْ أبحاثُ نيكولاوس كوپرنيكوس وغاليليو

---

(١) ذلك في العالَم الغربيّ، ولكنَّ القرآنَ الكريمَ قد جاء، قبل ذلك بقرونٍ طويلةٍ، بما لم يُعرَفْ مِن الحقيقةِ، في آيةٍ معجزةٍ واحدةٍ، في قوله تعالىٰ ﴿وكل في فلك يسبحون﴾ [يس: ٤٠]، علىٰ يدِ علماءِ الغربِ، إلاّ في القرنِ العشرين. وقولُه تعالىٰ إنما يشمِل كلَّ شيءٍ في الكون. قال الزمخشريُّ: «وكلٌّ مُستديرٍ مِن أرضٍ أو غيرِها فَلَكٌ». وقال الرازيُّ: «لا يجوزُ أن نقولَ ﴿وكلٍ في فلك يسبحون﴾، إلاّ ويدخلُ في الكلامِ النجومُ مع الشمسِ والقمرِ لِيَثْبُتَ معنىٰ الجمع ومعنىٰ «الكلّ». وقال مخلوف: «﴿وكل في فلك يسبحون﴾ أي يدورونَ». ولَكَمْ قد تكررت الآياتُ القرآنيةُ الكريمةُ عن السَّبْح والسابحاتِ، أي الجارياتِ في أفلاكها جَرْياً سريعاً هادئاً. انظرْ موضوعَ «وكل في فلك يسبحون، مَعانٍ للسَّبح عديدة»، في كتاب «أسرار الكون في القرآن» للمترجم، دار الحرف العربي (١٩٩٩)، بيروت، ط٢، ص ٧٥ ـ ٧٧، وموضوع «السبح والتسبيح»، ص ٢٠٨ ـ ٢١٦، و«المسبحات السبع»، ص ٢٥٦ ـ ٢٦١، مِن الكتابِ ذاتِه.

ولقد عَرَفَ العربُ، مِن قديمٍ، عِلْمَ الفَلَكِ بهذا الاسم، والفَلَكُ لُغَةً هو الدَّوَرانُ، وهو قد دلَّ على أنَّ =

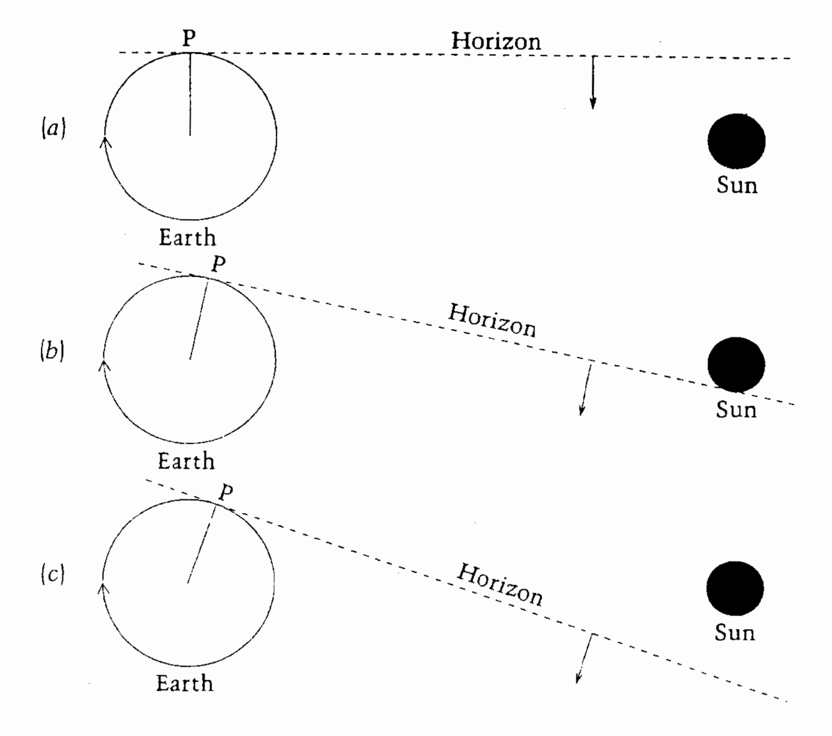
غاليلي، في آخِرِ الأمر، إلىٰ إحداثِ ثورةٍ في التفكير، وإنَّما، مَرَّةً أخرىٰ، ليس في أثناء حياتِهما. وجادلَ كوپرنيكوسُ (١٤٧٣ ـ ١٥٤٣) بالقولِ بأنّ الأرضَ لا تلفُّ حولَ محورها وحَسْب، بل إنها تدورُ حول شمسٍ ثابتةٍ أيضاً. وقد استُقبِلَ كتابُه الموسومُ بعنوانِ **De Revolutionibus Orbium Celestium**، وهو الكتابُ الذي أعطىٰ وصفاً كاملاً لكيفيةِ دورانِ الكواكبِ السيارةِ كلِّها، ومِن ضمنِها الأرضُ، حول شمسٍ ثابتةٍ، بشعورٍ عدائيٍّ حيثُ اعتُقِدَ علىٰ نطاقٍ واسعٍ بأنها ضدُّ المُعتَقَدِ الدينيّ.

أمّا غاليليو (١٥٦٤ ـ ١٦٤٢)، فلقد نافَحَ بقوةٍ وعزيمةٍ أكبرَ عن نظريةِ كوپرنيكوس، وقد سِيقَ إلىٰ محاكمِ التفتيش، لنشرِهِ آراءً اعتُبِرَتْ تجديفيةً. وحتّىٰ لا يفقدَ غاليليو حياتَه، فلقد أعلنَ عن توبتِه، ولكنّه ظلَّ في قرارةِ نفسِه مستمراً علىٰ الاعتقادِ بنظريةِ كوپرنيكوس عن الأرضِ المتحركة. ويُعتقَدُ بأنه قد غمغَم، قائلاً لنفسه، بعدَ توبتِه: **Eppur si muove**، وتعني «**ولكنها، أي الأرضُ، تدورُ فعلاً**».

إماطةُ اللثامِ عن اللُّغْز

فَلْنَعُدْ، بعد أن ابتعدْنا عن موضوعِنا، إلىٰ لُغزِ شروقِ الشمسِ مِن الغرب. ولَسَوفَ نَتَّبِعُ خُطىٰ كوپرنيكوسَ وغاليليو، وننظرُ في مِثالِ الأرضِ التي تلفُّ حول نفسِها. ويُرينا الشكل ١,٤ (أ) دائرةَ خطِّ عَرْضِ latitude مدينة شيكاغو، ويلفُّ هذا الخطُّ مِن الغربِ إلىٰ الشرقِ، حول الكرةِ الأرضيةِ كلِّها، ويمرُّ عَبْرَ موقعِ شيكاغو. لِنَرْسمْ خطّاً مُماسّاً لهذه الدائرة، فعندما تلفُّ الكرةُ الأرضيةُ حول نفسِها، فإنّ هذا الخطَّ المُماسَّ سوف يُغيِّرُ مِن اتجاهِه في الفضاء. ونرىٰ في الشكلِ ١,٤ (أ) الشمسَ وهي تقعُ تحت الخطِّ المماسِّ، أي أنها تقعُ تحت الأفقِ الشرقيِّ، ولذا فإنّها تكونُ غيرَ مرئيةٍ. وبعد زمنٍ قصيرٍ، وكما في الشكلِ ١,٤ (ب)، فإنّ الخطَّ المماسَّ سوف يلامسُ الشمسَ التي سوف تبدو في شروقِها. أمّا في الشكلِ ١,٤ (ج) فإنَّ الشمسَ تقعُ فوق هذا الخطِّ، أي أنها فوق الأفق. وهكذا فإنَّ ارتفاعَ الشمسِ مِن الشرقِ يُمكِنُ فَهمُهُ تماماً بلَفِّ الأرضِ حول

= أساسَ كلِّ شيءٍ في الكونِ هو الدورانُ، فجاءَ هذا الاسمُ اسماً علىٰ مُسَمّىً، ولقد أثبتَ القرآنُ الكريمُ ذلك في قوله تعالى: ﴿وكل في فلك يسبحون﴾. وأما الغربيونَ فلقد أسموهُ، وبالحرفِ، بعِلمِ النجوم Astronomy (ـ Astro= نَجم)، وأمّا كلمةُ Astrology عندهم فتعني علمَ التنجيم، وما هُو بِعلَم! فصارَ الاصطلاحُ العربيُّ عَلَماً علىٰ الدورانِ، في الكونِ، لكلِّ شيءٍ، ومِن ذلك النجومُ أو غيرُ النجوم. ولم يُزِد الاصطلاحُ الغربيُّ علىٰ تسميتِه لعلمِ الفَلَكِ بعلمِ النجوم، مِن غيره إشارةٍ إلى دورانٍ لها أو لغيرِها. د.س



الشكل ١,٤ : لو نظرْنا مِن المحورِ الجنوبيِّ الشرقيِّ للأرض، فإن خطّ العَرْض يدورُ مع عقاربِ الساعة. ونرىٰ في (أ) الخَطَّ المُماسّ ممدوداً إلىٰ الشرق، وهو ما يُمثِّلُ الأفقَ، والشمسُ تحتَه. أمّا في (ب)، فإنّ الشمسَ تَقَعُ فوق خطِّ الأُفقِ مُباشرةً، وقتَ طُلوعِ الشمس، ولكنْ وبَعْدَ قليلٍ من ذلك (ج) يكونُ الأفقُ قد تحرّكَ بأكثرَ من ذلك، بحيث تكون الشمسُ فوق خطِّ الأفق.

نفسِها مِن غربٍ لِشرق. ويكنُ أن نُفَسِّرَ، وبطريقةٍ مُماثلةٍ، غروبَ الشمس بحركةِ خطِّ الأفقِ مِن أسفل إلىٰ أعلىٰ.

فَلْنتخيَّلْ الآنَ أنَّ لَفَّ الأرضِ حول نفسِها قد انعكسَ! أي أنها صارتْ تَلفُّ مِن شرقٍ لِغرب، بدلاً مِن غربٍ لشرق. يمكننا أنْ نستنتجَ، حينئذٍ، وبالتعليلِ ذاته، أنَّ الشمسَ سوف تشرقُ مِن الغربِ وتغيبُ مِن الشرق.

ولكنَّ هناكَ عائقاً في تفسيرنا يُعيقُ الاستنتاجَ الذي توصّلنا إليه حتىٰ الآن، إذ إننا لا يُمكننا حَقّاً أن نعكِسَ اتّجاهَ لَفِّ الأرض حول نفسها، فما هي الفائدةُ إذاً مِن هذه المناقَشةِ المُتَخَيَّلَة؟ كيف يمكنُ أنْ نُفسِّرَ تجربةً حقيقيةً كالتي مَرَّ بها ديفد ديو هيرست والمؤلِّف؟ إنَّ ذلك لَمُمْكِنٌ، علىٰ أن نُضيفَ إليه مفتاحاً واحداً لم نستخدمْهُ بعدُ،

والمفتاحُ هو: **لقد كنّا مُسافرين في طائرةٍ نفاثةٍ تطيرُ مِن الشرق إلىٰ الغرب**. ماذا يحدثُ لو تجاوَزَتْ سرعتُنا، في اتّجاهنا نحو الغرب، سُرعةَ لَفِّ الأرضِ نحو الشرق؟

قد يُفيدنا هنا أن نضربَ لذلكَ مَثَلاً، فإذا كُنتَ تَقِفُ علىٰ حِزام متحرّكٍ في مطارٍ ما، فإنه يسيرُ بك باتّجاه حركة الحزام مِن دونِ حاجةٍ منكَ إلىٰ أن تسيرَ عليه. ولو كنتَ في عَجَلةٍ مِن أمرِك فقد يُمكنُكَ أن تسيرَ علىٰ الحزام بالاتجاهِ ذاته، حتىٰ تزيدَ مِن سرعةِ وصولك. ولكنْ، فلنفترضْ ويا لَلغرابةِ، أنك قد قرَّرْتَ أن تسيرَ في الاتجاه المعاكس، فعندئذٍ، وما لَمْ تَسِرْ (أو تعدو) بسرعةٍ كافية، فإنك ستكونُ حينئذٍ لا تزال تسيرُ باتجاهِ حركةِ الحزام. ولكنكَ إذا ما عَدَوْتَ عَدْواً سريعاً بما يكفي، فقد تتمكّنُ مِن أن تعكِسَ اتجاهَ حركتِكَ، فعلاً.

استبدِلِ الأرضَ التي تلفُّ حولَ نفسِها بالحزام المتحرك، والطائرةَ النفّاثة بَدَلاً من العَدْو، ولَسَوفَ تفهمُ السِّرَ، فإنّه إذا كان بإمكانِ طائرتِكَ النفَّاثةِ أن تطيرَ بِأسرعَ مِن حركةِ الأرضِ مِن الغربِ إلىٰ الشرق، فإنك تكونُ بذلك كأنّك في أرضٍ تدورُ في الاتّجاهِ المُعاكس. ولكنْ كم يتوجّبُ أن تكونَ عليه سرعةُ الطائرة النفّاثة هذه، حتىٰ تحصلَ علىٰ هذا التأثير؟

افترِضْ أنَّك كنتَ تطيرُ فوق خطِّ الاستواء. إنَّ الجغرافيّينَ يخبّرونا بأنَّ محيطَ الأرضِ، في خطِّ الاستواء، يبلغُ ٤٠٠٠٠ كيلومترٍ تقريباً. إذ إنَّ الأرضَ تلفُّ حولَ محورِها مرّةً واحدةً في كلِّ يوم، وهكذا فإنَّ نقطةً ما ثابتةً علىٰ خطِّ الاستواء تتحركُ ٤٠٠٠٠ كيلومترٍ في ٢٤ ساعة. وبحسابٍ بسيطٍ يتبيّنُ أنَّ ذلك يُعادلُ سُرعةً يبلغُ معدّلُها ١٦٦٧ كيلومتراً في الساعة. ويُمكنُ لطائرةٍ فوقَ الصوت supersonic، كالكونكورد، أن تتعدّىٰ هذا الحدّ، ولكن ليس طائرة ٧٠٧ النموذجية، أو طائرة الجامبو النفّاثة. إنَّ الطائراتِ التجاريةَ تَصِلُ سُرْعاتُها إلىٰ ما دونَ ١٠٠٠ كيلومترٍ في الساعة بقليل، وهكذا لا يُمكنُ لطائرة الجامبو النفّاثة أن تُضاهيَ أو تتجاوزَ سرعةَ دورانِ الأرضِ حولَ نفسِها، عندَ طيرانِها فوق خطِّ الاستواء.

ولكنَّ الأمرَ يصيرُ أيسرَ مِن ذلكَ في خطوطِ العَرضِ الأبعد. لقد اتَّخذَتْ طائرتُنا، مِن لندنَ إلىٰ شيكاغو، مساراً مرَّ بها مِن فوق الطرفِ الجنوبيِّ لِغرينلاند. وهذا المسارُ يأخذُ الطائرةَ إلىٰ خطوطِ عَرْضٍ أعلىٰ مِن خطوطِ العَرْض التي تمرُّ بلندنَ وشيكاغو. وهكذا، فعندما مَرَّت الطائرةُ فوق غرينلاند، فلا بُدَّ أنها لامست أو حتىٰ تجاوزت خطَّ عَرضِ ٦٠ درجة. وفي خطِّ العَرْضِ هذا، وكما في الشكل ١,٥ ، فإنَّ مُحيطَ الأرضِ لا

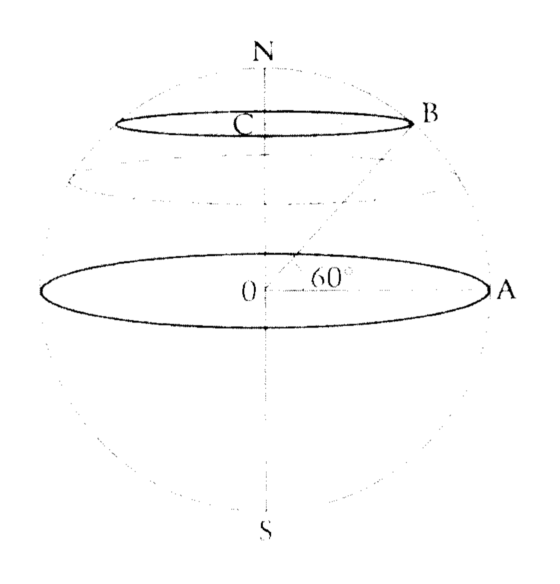
يبلغُ إلاَّ حوالىٰ ٢٠٠٠٠ كيلومترٍ فقط، أي أنّ سُرعةَ نقطةٍ ما ثابتةٍ علىٰ خطِّ العَرْضِ المذكورِ هي أقلُّ مِن ٨٥٠ كيلومتراً في الساعة، وهو ما يُمكنُ لِطائرةٍ نفّاثةٍ تطيرُ مِن الشرقِ إلىٰ الغربِ أن تتجاوزَه.

وهذا ما حدثَ للطائرةِ التي كنتُ أستقِلُّها في ذلك المساءِ مِن كانونِ الأول، وهو السببُ الذي جعلَ في مَقدوري أن أرىٰ الشمس وهي تطلعُ مِن الغرب.

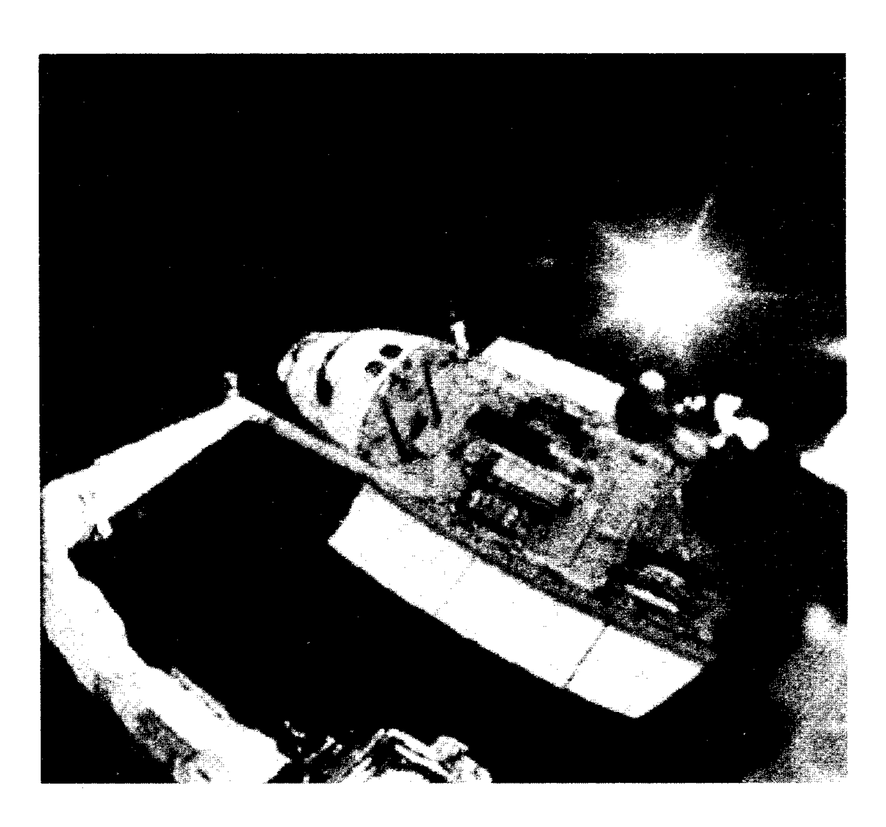
ظلامٌ عند الظَّهيرة

تُرينا الصورةُ الظاهرةُ في الشكل ١,٦ الشمسَ مُشرِقةً في سماءٍ مظلمة. نعم، إنَّ كُرةَ الضوءِ المُشِعّةَ في الصورةِ لَهِيَ الشمسُ فعلاً. ولكنْ، ما الذي دهىٰ ضوءَها الذي يَغمُرُ، في العادة، السماءَ كلَّها باللون الأزرق؟ هل قد فَقَدَتِ الشمسُ قدرتَها علىٰ إضاءةِ ما حولَها؟ نحن لا نعرفُ إلاَّ حالةً واحدةً لذلك، وهي نادرةُ الحدوثِ في ذاتِها، حيثُ تكونُ الشمسُ حينئذٍ في كَبدِ السماء ولكنَّ الجوَّ مظلمٌ حولَها، وهي ظاهرةُ كسوفِ الشمسِ الكُليِّ total solar eclipse. ولكنَّ قرصَ الشمسِ سوف يكونُ محجوباً حينئذٍ بالقمر الذي يحجُبُ ضوءَ الشمس، وفي هذه الحالةِ لن يكونَ في مقدورِنا مشاهدةُ

(١) إذا كنتَ تسكنُ السويد، أي في خطِّ عرض ٦٠°، فإنك تسيرُ من خلال سير الأرض بك، بسرعة ٨٥٠ كيلومتراً في الساعة، وحسب، وأما إذا كنت في ماليزيا أو الكونغو، أي قرب خط الاستواء، فإن سرعة دورانك، من خلال دوران الأرض بك، ستكون ضعف تلك السرعة، أي ١٦٦٧ كيلومتراً في الساعة، أي أربعين مرة بقدر سرعة سيارة تسير بسرعة ٤٠ كيلومتراً، في الساعة، داخل المدينة. وأنت تسير بتلك السرعة الهائلة، ومعك تسير الأرض كلها، طيلة عمرك، سيراً رفيقاً لا اهتزاز فيه ولا ارتعاش. بل ماذا أقول؟ إنك لا تشعر بذلك كله البتَّة! وأنت تَدْرُجُ على سطح الأرض مُذْ أنت طفلٌ وحتى أن تشيخ، بكل يسرٍ وطمأنينةٍ ورخاء، من غير أن تفكر بذلك، ولا أن يخطر ببالك كيف هو كان. ولكن انظر إلى جاذبية الأرض كيف تلصقك بها التصاقاً، لو هي فاقت، وكيف أن القوة المعاكسة لقوة جاذبية الأرض، وهي تنتج عن دوران الأرض حول نفسها تنزعُ إلى أن ترميك بعيداً عنها. ولكن التوازن بين القوتين، في محصلته، يجعلك في وضعك الصحيح والمناسب تماماً. وتنشأُ القوة الأولى، أي قوة جذب الأرض، من توازن آخرَ دقيق جداً في داخل التوازن الثاني، وذلك ينشأُ من مقدار نصف القطر، أي بُعدِ سطح الأرض عن مركزها الموزون حسب حاجتنا بالضبط، فلا هو بالزائد ولا هو بالناقص، فيا له من حسابٍ موزونٍ مضبوطٍ لم يخطر على بال، إذ لو صغر حجم الأرض فصار كحجم القمر، مثلاً، وإذاً لطَوَّحَتْ بك خُطوتُك التي تخطوها فوق أديم الأرض كتطويح القمر بمن قد خطا على سطحه، ذلك لأن جاذبية القمر تبلغ سدسَ جاذبية الأرض على سطحها. فسبحان مَن قد خلق ذلك كلَّه بقَدَرٍ، أو مقدار، وميزان ﴿والسماء رفعها ووضع الميزان﴾ [الرحمن: ٧] ﴿الذي له ملك السموات والأرض ولم يتخذ ولداً ولم يكن له شريك في الملك وخلق كل شيء فقدره تقديراً﴾ [الفرقان: ٢] صدق الله العظيم. د.س



الشكل ١,٥ : يصبحُ خطُّ العَرضِ أصغرَ كلّما ابتعدْنا عن خطِّ الاستواءِ نحو القطبين. وفي خطِّ عَرْضِ ٦٠ درجة، فإنَّ مُحيطَ الأرضِ هو نصفُ محيطِها في خطِّ الاستواء. وفي الشكلِ فإنَّ CB= ١/٢ OA.



الشكل ١,٦ : الشمسُ مُشرِقةٌ في سماءٍ مظلمة (عن NASA).

الشمسِ المُشِعَّة التي نراها في هذه الصورة. كيف نفسِّرُ إذاً الصورةَ علىٰ افتراضِ أنها صورةٌ حقيقية؟

وقبلَ أن أجيبَ علىٰ هذا السؤال، وأُشاركَكَ سِرَّ هذه الصورة، فلْنتمعّنْ في السبب الذي يجعلُنا نرىٰ الشمسَ، في يومٍ صاحٍ، وهي تشرقُ في سماءٍ زرقاء. ثم لماذا تبدو السماءُ ذاتُها، عند الغروب، وقد اصْطبغتْ بالمَسْحَةِ الحمراء قُرْبَ الأفق؟ بَلْ حتىٰ قُرْصُ الشمسِ ذاتُه يكون مُكتسياً، عندَ الغروب، باللونِ الأحمر، فَلِمَ ذاك؟

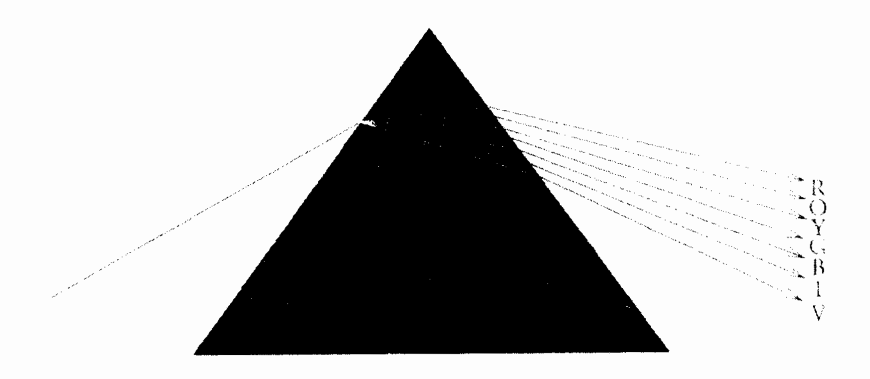
لِمَ هي السَّماءُ زرقاء؟

يكمنُ الجوابُ علىٰ هذا السؤال في ميزةٍ للضوءِ تُعرَفُ **بالتبعثر scattering**.

عندما تَسقُطُ أشعةُ الضوءِ علىٰ جُسَيْمةٍ دقيقة مِن الغبارِ، يُمكِنُ أن يَحدثَ لها أحَدُ أمرَيْن: فهي إمَّا أن تمتصَّها جسيمةُ الغبار، أو قد تُغيِّرُ مِن اتجاهها مِثْلَ كُرَةٍ تقفزُ مِن علىٰ قطعةٍ مِن الصخرِ علىٰ الأرض. وهكذا فعندما تسيرُ أشعةُ الضوءِ عبرَ وَسَطٍ مُغْبَرٍّ فإنها تُمتَصُّ جُزئياً وتتبعثرُ جُزئياً عندما تُواجهُ جُسيماتِ الغبارِ الواحدةَ تِلْوَ الأخرىٰ. ولكنَّ تبعثرَ الضوءِ يتسبّبُ في أثرٍ آخرَ، إضافةً إلىٰ تبديلِ اتجاهِ الأشعة.

ويُعرَفُ هذا الأثرُ **بالتشتُّت dispersion**، وهو ما يعني، ببساطةٍ، أنَّ الضوءَ ينفصلُ إلىٰ ألوانِه المُكَوِّنَةِ له. ونحن نرىٰ مثلَ هذا الأثرِ في حالةٍ أخرىٰ، عندما نُمَرِّرُ ضوءَ الشمس مِن خلالِ موشورٍ زجاجيّ (انظر الشكل ١,٧). وعندما تمرُّ أشعةُ الضوءِ عبرَ الموشورِ فإنَّ الأشعةَ تُغيِّرُ مِن اتجاهها، ويحدثُ ذلك أوّلاً عند دخولِها زجاجَ الموشور، ثمَّ مِن بَعدِ ذلك عند خروجها منه. وعلىٰ عكس **التبعثر scattering** الذي يُحوِّلُ اتجاهَ أشعةِ الضوءِ كيفما اتفقَ، فإنّ هذا التغيّر يتمُّ باتجاهٍ مُعَيَّنٍ يمكنُ تحديدُه بِدقّةٍ، وتُعرَفُ هذه الحالةُ **بالانكسار refraction**، ويعتمدُ ذلك علىٰ الوَسَطِ الذي كان الضوءُ يسيرُ فيه أولاً (الهواء)، وعلىٰ الوسطِ الذي يدخلُه (الزجاج)، وعلىٰ **لونِ** الأشعة. إنّ الخصيصةَ الأخيرةَ هي السببُ في انفصالِ مُكوّناتِ الأشعةِ الداخلةِ عبرَ الموشورِ إلىٰ سبعةِ ألوان.

ويمكنُ ربطُ صفةِ اللونِ بصفةٍ أساسيةٍ للضوءِ هي طولُه الموجيّ wavelength. وهكذا يمكنُنا أن نقولَ إنَّ الضوءَ الأحمرَ يمتلكُ، مِن بينِ الألوانِ السبعةِ السابقةِ كلِّها، أقصىٰ طولٍ موجيٍّ، وإنَّ البنفسجيَّ منه يمتلكُ أقصىٰ طولٍ موجيّ. ما هو **الطولُ الموجيّ**؟ سوف نأتي إلىٰ هذه الصفة الأساسيةِ لاحقاً في هذا الفصل، ولْنركّز الآنَ علىٰ صفةِ اللون، وهي ما يُمكنُ أن نتعرّفَ عليها بسهولة.

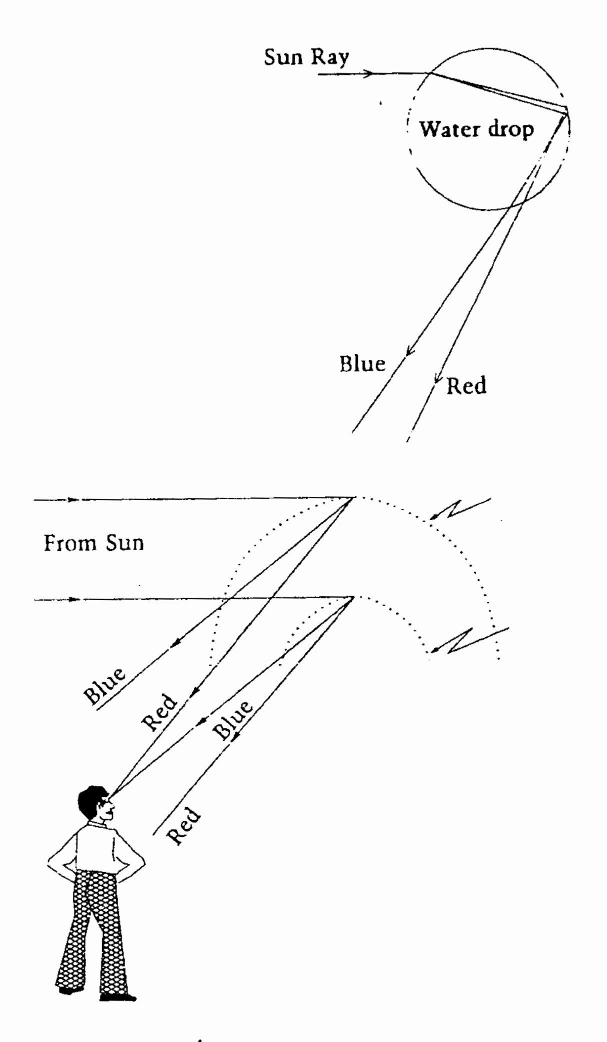


الشكل ١,٧ : انفصالُ مكوّناتِ ضوءِ الشمسِ إلىٰ سبعةِ ألوانٍ، بعدَ مروره عَبْرَ موشورٍ زجاجيٍّ.

نحن نعلمُ بأنّ الألوانَ المختلفةَ التي تُكَوِّنُ ضوءَ الشمسِ هي في الأساس البنفسجيُّ، والنيليُّ، والأزرقُ، والأخضرُ، والأصفرُ، والبرتقاليُّ، والأحمر. ومِن بينِ هذه الألوانِ، فإنَّ البنفسجيّ هو الأكثرُ انحناءً، والأحمرُ هو الأقَلّ. وتَقَعُ بقيّةُ الألوانِ بين هذين اللونيْن. ويُمكنُ معرفةُ درجاتِ انحناءِ الألوان المختلفة حسابياً. ويُمكِّنُنا هذا الحسابُ مِن أن نفهمَ السببَ في خُروجِ أشعّةِ ضوءِ الشمسِ المارّةِ عَبْرَ الموشورِ الزجاجيِّ علىٰ شكلِ حُزمةٍ مِن سبعةِ ألوان.

ويحدثُ الشيءُ ذاتُه، في الطبيعةِ، عندما يمرُّ ضوءَ الشمسِ مِن خلالِ قطراتِ المطرِ، وهو ما يُعطي ذلك المنظرَ المشهودَ لقوسِ قُزَحَ rainbow، وبالإضافةِ إلىٰ حُدوثِ انكسارٍ لِأشعةِ الضوء، فإنها تنعكسُ داخلياً مِنَ الحافةِ الخارجيةِ لكلِّ قطرةِ مطرٍ، وكما في الشكل ١,٨. إنَّ الشكلَ الدائريَّ لقوسِ قزحَ يجيءُ مِن حقيقةِ أنَّ ضوءَ كلِّ لونٍ مُختَلِفٍ يدخلُ أعيُننا مِن اتّجاهٍ يمتلكُ درجةَ المَيْلِ ذاتَها مع اتّجاهِ ضوءِ الشمس. وهكذا فإننا نرىٰ لوناً أخّاذاً، مُتوزِّعاً في قوسٍ دائريٍّ حول هذا الاتجاه. ولمَّا كانتِ الألوانُ المختلفةُ يتمُّ انكسارُها بدرجاتٍ مختلفةٍ، فإننا نرىٰ أقواساً مِن ظِلالٍ مختلفةٍ للألوان، ويكون اللونُ البنفسجيُّ فيها أقربَ إلىٰ الداخل، والأحمرُ أقربَ إلىٰ الخارج.

إنّ جزءاً صغيراً مِن أشعةِ الضوءِ يتمُّ انعكاسُهُ داخليّاً، مرّتيْن. وتُرينا هذه الأشعةُ، عند خروجها مِن قطرةِ المطرِ قوسَ قُزَحٍ ثانياً أبهتَ مِن الأولِ، وبترتيبٍ مقلوبٍ للألوان (بسببِ الانحناءِ الثاني). إنَّ التبعثرَ الناتجَ عن الغبارِ الجويِّ يتسبّبُ في حدوثِ الأثرِ ذاتِهِ



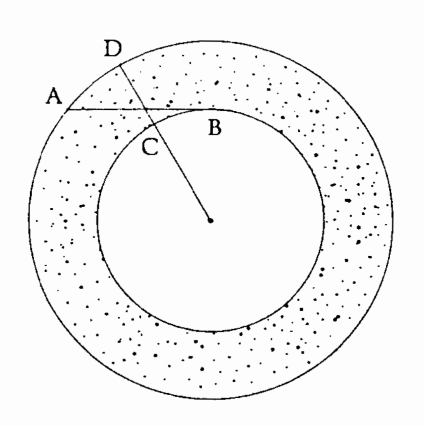
الشكل ١,٨ : عندما تدخلُ أشعةُ الشمسِ قطرةَ المطرِ فإنها تتجزّأُ إلىٰ ألوانٍ مختلفةٍ ثم هي تنعكسُ جميعاً في الجهةِ الأبعدِ مِن القطرةِ، وتخرجُ منها باتجاهاتٍ مختلفة. وبالنسبةِ إلىٰ المُشاهدِ، فإنَّ أشّعاتِ الألوانِ المختلفةِ تأخذُ شكلَ أقواسٍ دائريةٍ متتالية، وتميلُ إلىٰ الداخلِ مِن الأحمرِ وحتىٰ الأزرقِ والبنفسجيِّ.

تقريباً علىٰ ضوءِ الشمس، إذ إنه يُجزّئُهُ إلىٰ ألوانٍ مختلفة، وتتمُّ بعثرةُ اللونِ البنفسجيِّ فيه أكثرَ شيءٍ، واللونِ الأحمرِ أقلَّ شيءٍ. والفرقُ الوحيدُ ما بين مُرورِ الضوءِ عَبْرَ قطراتِ المطرِ أو بَعْثَرَتِها مِن قِبَلِ الغبارِ هو أنَّ التغيّرَ في اتجاهِ الضوءِ يتمُّ، في الحالةِ الثانية، كيفما اتّفقَ، ولذا فإننا لا نرىٰ مثلَ ذلكَ الشكلِ المتجانسِ لقوسِ قزح، ولكننا نرىٰ، بدلاً من ذلك، الألوانَ الأكثرَ بعثرةً، وهي من عائلةِ البنفسجيِّ ـ النيليِّ ـ الأزرقِ، والتي تنتشرُ

عبرَ السماء، بينما لا تتبعثرُ الألوانُ الأخرىٰ (الأقلُّ تبعثراً) ولا تنتشرُ بالقَدْر ذاته. واللونُ الأزرقُ هو الطاغي بين الألوانِ الأكثرِ تبعثراً.

وإذا ما ابتعدْنا قليلاً عن مناقشتِنا، لَأَمكنَ لنا أن نشرحَ سببَ جَعْلِ أضويةِ المرور، المخصّصةِ للتوقّفِ، حمراءَ، وسببَ استخدامِ الألوان الحمراءِ، عموماً، للتحذيرِ من مخاطرِ الطريق. فمِنْ أجلِ سلامةِ سائقي المركباتِ فإنّ مِن الضروريِّ التأكدَ مِن أنّ إشارةَ التحذيرِ مِن الخطرِ يُمكنُ رؤيتُها بسهولةٍ علىٰ مسافاتٍ بعيدةٍ، حتىٰ يُمكنَ للمركباتِ المُسرعةِ أن تتخذَ القرارَ المناسبَ بالإبطاءِ أو التّوقّف. ولأنّ اللونَ الأحمرَ هو اللونُ الأقلُّ تبعثراً فإنه يسيرُ المسافةَ الأبعدَ في اتجاهِه الأصليّ. وهكذا، ففي الجوِّ المغبرِّ، تكونُ إشارةُ التوقّفِ المروريِّ هي الأسهلَ رؤيةً **علىٰ أبعدِ مسافةٍ مُمكنةٍ**، وذلك لأنها حمراء.

كما يمكنُنا الآنَ أن نُجيبَ علىٰ السؤالِ الآخرِ، عن حُمرَةِ الشمس الآخذة بالغروب. عندما تكونُ الشمسُ قريبةً من الأفقِ، فإنّ ضوءَها يسيرُ عبرَ جزءٍ أكبرَ مِن الغلافِ الجويِّ مِمّا لو جاءَ عالياً مِن فوقِ الأفق، ويوضِّحُ الشكل ١,٩ كيفيةَ حدوثِ ذلك. ولذا فإنَّ ضوءَ الشمسِ يتبعثرُ أكثرَ ما يكونُ في طريقه إلينا. ثُمَّ إنَّ هذه الأشعةَ، قريباً مِن خطِّ الأفق، تمرُّ عبرَ السطحِ الأرضيِّ المغبرِّ قبل أن تصلَ أعينَنا. وفي هذه الرِّحلةِ فَإنَّ اللونَ الأقلَّ تبعثراً، وهو الأحمرُ، يصلُنا عبرَ المَسارِ كلِّهِ، فيكسِبُ الشمسَ مظهرَها المُشْرَبَ بالحُمرة.



الشكل ١,٩ : يسير شعاعُ الشمسِ، قربَ الأفقِ، عبرَ طبقةٍ أكبرَ مِن الغبارِ في الجوِّ مِمّا لو كان آتياً مِن فوقِ الرأسِ (سَمْتيّاً)، وفي الشكلِ، فإنَّ المسارَ AB هو أطولُ مِن المسارِ CD (الجزءُ المغبرُّ هنا مُنقّطٌ).

هل يمكنُ للشمسِ أن تشرقَ في سماءٍ مُظلمةٍ؟

تخيَّل الآنَ موقفاً مُغايراً، حيثُ لا يواجهُ ضوءُ الشمسِ أيَّ غبارٍ علىٰ الإطلاق. وعندئذٍ لن يتبعثرَ هذا الضوءُ، بل إنه سوف يسيرُ نحوَنا علىٰ مسارٍ مستقيم. ولن نرىٰ، حينئذٍ، إلاَّ قرصَ الشمسِ المُشرقةِ وحَسْبُ، ولن يكونَ هناك شيءٌ آخرُ مُضاءَ. . . ذلك لأنه ليس هناك مِن شيءٍ يُمكنُ أن يَسقطَ عليه ضوءُ الشمسِ حتىٰ يُبعثرَه. وهكذا فلو قُدِّرَ لضوءِ الشمسِ أن يسيرَ عبر وَسَطٍ خالٍ من الغبار تماماً، فإنه سوف يسيرُ حينئذٍ مِن دونِ أيِّ تبعثرٍ، وكما نرىٰ في الشكل ١,٦.

ولكنَّنا نعيشُ محاطينَ بغلافٍ جويٍّ مغبرٍّ، وهكذا فإنّ مِن الواضح أنَّ أيَّ ضوءٍ للشمسِ يصلُنا بطريقةٍ غيرِ مباشرةٍ لا بدَّ مِن أن يتبعثرَ. وتسألُ: كيف يُمكنُ، بحقِّ الأرضِ، أنْ يَحدُثَ ما قد وصفتَه توّاً؟ والجوابُ هو ⟨ ليسَ علىٰ سطحِ الأرض! ⟩، بل يتوجَّبُ علىٰ المرءِ أن يُغادرَ الأرضَ ليرتفعَ فوقَ غلافِها الجوّيِّ، حتَّىٰ يحصلَ علىٰ الحالةِ التي وصفناها. حيثُ إننا قد نَجِدُ، هناك، فعلاً، ما يُمكنُ أن يكونَ مُنتجَعاً خالياً حقّاً مِن الغبار!

ويمكنُني أن أكشفَ، الآنَ، بأنّ الصورةَ التي تظهرُ في الشكل ١,٦، قد التُقِطتْ عامَ ١٩٩٣ مِن قِبَلِ مَلاَّحٍ فلكيٍّ كان في رِحلةٍ علىٰ متنِ المركبةِ الفضائيةِ إندِيڤايَرْ space shuttle Endeavour، عالياً فوقَ غلافِ الأرضِ الجويّ. إنّ هذه الميزةَ تمنحُ الفلكيَّ فُرصةً مُواتيةً، إذ إنها تُمكِّنُ الراصدَ الذي يستخدمُ المرقابَ الفضائيّ مِن أن ينظرَ إلىٰ النجومِ أو المجرّاتِ، في السماءِ المظلمةِ حتىٰ مع وجودِ الشمس! إلاَّ أنه لا بُدَّ للراصدِ المشدودِ إلىٰ سطحِ الأرضِ مِن أن ينتظرَ حتىٰ تغيبَ الشمسُ قبلَ أن يبدأَ مشاهداتِه التي يتعيَّنُ عليه إكمالُها قبلَ طلوعِ الشمس.

وهناك فوائدُ أخرىٰ للمرقابِ الفضائي space telescope الذي يتمتّعُ بميزةِ كونهِ فوق جوِّ الأرضِ. ولَسَوْفَ تتمُّ مناقشةُ ذلك، علىٰ أحسنِ وجهٍ، علىٰ ضوءِ مُغامرتِنا القادمة.

المناظرُ الغريبةُ مِن القمر

حتىٰ نتمكّنَ مِن رؤيةِ الشمسِ وهي تبزُغُ مِن الغرب، لا بدَّ لنا مِن أن نمتطيَ طائرةً نفّاثة. وحتىٰ نرىٰ الشمسَ وهي تطلعُ في كَبِدِ السماءِ المظلمةِ يتوجّبُ علينا أن نذهبَ إلىٰ ما فوقَ غلافِ الأرضِ الجويّ. ولسوف نذهبُ بعيداً، مِن أجلِ مغامرتِنا التالية، **حتىٰ**

نَحُطَّ رِحالَنا علىٰ سطحِ القمر. وماذا عسىٰ أن تبدوَ لنا السماءُ، عندَ النظرِ إليها مِن القمر؟ هل سيكونُ في مقدورِنا أن نشاهدَ الأرضَ مِن هناك، مثلما نحنُ نرىٰ القمرَ مِن هنا علىٰ سطحِ الأرض؟

إنَّ الصورةَ التي نراها في الشكل ١,١٠ تُعطينا الجوابَ علىٰ ذلك. إنها صورةُ الأرضِ كما تبدو لذلك الذي هو علىٰ سطحِ القمرِ، وقد التقطَها مَلاَّحو بعثةِ أپولّو ـ ٢ Apollo II. ويبدو شكلُ الأرضِ الهلاليُّ مُشابهاً لشكلِ القمر، اللَّهُمَّ إلاَّ أنها أكبرُ منهُ وأوضحُ. وهي **أكبرُ** منه لأنَّ قُطْرَ الأرضِ يبلغُ حوالىٰ أربعةِ أضعاف قُطْرِ القمر، ولذا فإنَّ الأرضَ تبدو، علىٰ البُعدِ ذاته، أكبرَ من القمر بأربع مرّات. كما أنها **أوضحُ** منه، لأنَّ القمرَ لا يمتلكُ غلافاً جوّياً.

ويلعبُ الغلافُ الجويُّ للأرض دوراً مُحْبِطاً مُزدوجاً لِعَمَلِ ملاّحي الفضاء، إذ إنه، أولاً، يمتصُ ويُبعثرُ، جزئياً علىٰ الأقل، أيةَ إشعاعاتٍ كونيةٍ متجهةٍ نحو الأرض، ثم إنه ثانياً، وبسببِ حركةِ الهواءِ، يجعلُ خيالَ أيِّ مصدرٍ سماويٍّ للضوء مُهتزّاً غيرَ ثابتٍ، أو مُضَبَّباً.

وبسبب خُلُوِّ القمر من أيّ غلافٍ جويٍّ فإنّه لا يحدث فيه أيُّ تبعثُرٍ لضوءِ الشمس،



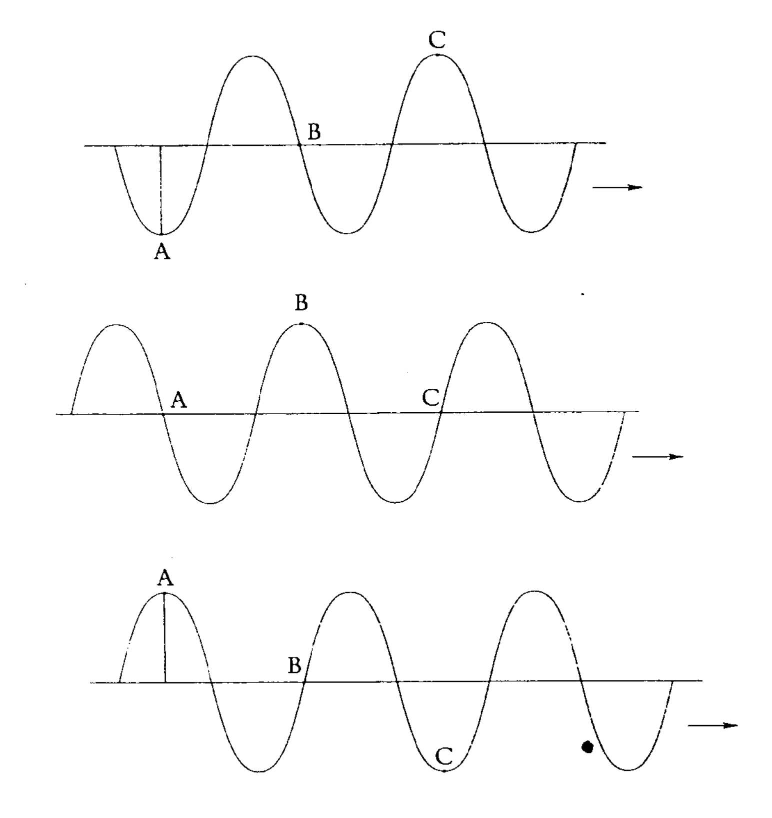
الشكل ١,١٠ : صورةُ الأرضِ، كما نراها مِن القمرِ، وقد التقطَها ملاّحو أپولّو ـ ٢ (عن ناسا).

وكنتيجةٍ لذلك فإنّ سماءَ القمر تتّصِفُ بالظلام، رغمَ الشمسِ الطالعةِ في السماء، وكما يظهر في الشكل ١,٦. وهكذا فإنَّ أجزاءَ القمرِ التي تُواجهُ الشمسَ هي مُضيئةٌ فعلاً بسببِ وقوعِ ضوءِ الشمسِ عليها، وإنّما تحت سماءٍ مظلمة! ويُعطينا الشكلُ ١,١٠ إلماعَةً عن هذا الظَّرْفِ الذي هو بالغُ الغرابة. ونقول عنه بأنه بالغُ الغرابةِ إذا ما نحنُ حَكَمْنا عليه بمقاييسِنا الأرضية. وبسببِ غلافِ القمرِ الجويِّ الضعيفِ جدّاً فإنه لا يكادُ يُمكنُ للصوت أن ينتقلَ عبره، ولذا فإنَّ سَماعَ صوتِ شخصٍ ما علىٰ سطحِ القمرِ يتحدّثُ إليك لَهُوَ أمرٌ غيرُ مُمكِنٍ.

وَدَعْني أذكرُ، علىٰ أيّةِ حالٍ، عَرَضاً، بأنَّ هناك وجهاً آخرَ رائعاً لِمشهدِ الأرضِ هذا المرئيِّ مِن القمر، مِمّا قد لاحظَه مَلاّحو أپولّو، ففي فترةِ بقائِهم علىٰ سطحِ القمرِ **لم ترتفعِ الشمسُ لا ولا هي غَرَبتْ مِن علىٰ سطح القمر، فلقد بَقِيَتْ حيثُ هي في السماء!** ولسوفَ نعودُ إلىٰ هذه الظاهرةِ الغريبة، والتي نملكُ لها تفسيراً منطقياً تماماً، مرّةً أخرىٰ. وهناك ظاهرةٌ أخرىٰ فريدةٌ، وهي أنّ النجومَ التي ننظرُ إليها من علىٰ سطح القمر لا تتلألأُ. وحتىٰ نُقَدِّرَ ونفهمَ هذه الظواهرَ لا بدَّ لنا مِن أن نتعمّقَ قليلاً فيما يعنيه الضوءُ حقّاً.

الضوءُ باعتبارِه موجةً

للضوءِ مظاهرُ عديدةٌ، وأكثرُ أشكالِهِ الاعتياديةِ هو ضوءُ الشمس الذي تستخدمُه أعيُننا للنظر، إنّ هذا الضوءَ، وكما رأينا مِن قبلُ، يتألفُ مِن سبعةِ ألوان، ولكنْ، كيف يُمكنُ أن نَصِفَ الضوءَ ذا الألوانِ المختلفةِ لشخصٍ مُصابٍ بعَمىٰ الألوان؟ وما خلا الضوءَ، ما هي الخصيصةُ التي تُميّزُ الضوءَ الأحمرَ عن الأزرقِ، مثلاً؟ نحنُ نقولُ، باللّغةِ التقنيّةِ، بأنّ **الطولَ الموجيَّ wavelength** هو الذي يصنعُ الاختلافَ، فهو أطولُ في الضوء الأحمر عمّا هو في الضوءِ الأزرق. وتتعلّقُ كلمةُ طولِ الموجةِ هنا بحقيقةِ أنّ الضوءَ يمتلكُ شكلَ الموجة. وما هو معنىٰ الموجةِ الذي نقصدُهُ بالضبط؟ إنّ الشكلَ ١,١١ يُبيّنُ لنا شكلاً مَوْجيّاً نموذجياً كالذي نراهُ عند رَمْينا بِحَصاةٍ إلىٰ سطحِ الماءِ الساكنِ في البركة. وإنّكَ لَترىٰ علىٰ سطحِ الماءِ التموّجاتِ الناتجةَ عن الحَصاةِ وهي تتحركُ إلىٰ الخارجِ علىٰ شكلِ موجاتٍ. ولكنَّ نظرةً أكثرَ تدقيقاً إلىٰ سطحِ الماءِ تُرينا أنّ السطحَ يتحرّكُ إلىٰ أعلىٰ وأسفل، وبطريقةٍ تتحركُ معها جُسيماتُ الماءِ أيضاً، وبكلِّ بساطةٍ، إلىٰ أعلىٰ وأسفل، ولكنَّ الاضطرابَ كَكُلٍّ يبدو مُتحرّكاً إلىٰ الخارج.



الشكل ١,١١: تتحركُ النقاطُ A، B، C، . . . **في مواضعِها**، إلىٰ الأعلىٰ والأسفلِ، مِن دونِ أن تتحركَ إلىٰ اليمين، رغمَ أننا عند مقارنتنا لمنحنىٰ التوزيعِ distribution curve في المراحلِ المتعاقبة نَخرجُ بانطباعٍ عامٍّ بوجود شكلٍ متموّجٍ متحرّكٍ نحو اليمين. وفي أيِّ وقتٍ مُحدَّدٍ بِذاتِه، فإنَّ المسافةَ بين نقطتيْنِ متتاليتينِ لِأقصىٰ إزاحةٍ علْويةٍ تُعرَفُ **بالطولِ الموجيّ** للموجة. وكذا فإنَّ عدد التحرّكاتِ إلىٰ الأعلىٰ والأسفل، في أيةِ نقطةٍ، وفي كلِّ وِحدةٍ زمنية، تدعىٰ **بتردّد الموجة frequency of the wave**. إنَّ هذه الأشكال الثلاثة تُرينا نصفَ دورةٍ كاملة، تتقدّمُ فيها الموجةُ بمقدارِ نصف الطولِ الموجيّ.

وهذهِ خصيصةٌ تَتَّصِفُ بها حركةُ الموجةِ المستعرَضةُ. وعندما تتحركُ الموجةُ عبرَ وسطٍ ما، فإنها تتسبّبُ في حدوث حركاتٍ فيها إلىٰ الأعلىٰ والأسفل. وكلُّ حركةٍ مِن هذا القبيل، إلىٰ أعلىٰ ـ أسفل ـ أعلىٰ، في أيّةِ نقطةٍ كانت، تُدعىٰ بـ «**الدورة**» **cycle**. فلْنثبِّتْ وِحدةً زمنيةً، ولتكن **الثانيةَ الواحدة**، ونَقُمْ بتعدادِ هذه الحركاتِ إلىٰ أعلىٰ ـ أسفل ـ أعلىٰ، في نقطةٍ مُحدَّدَةٍ. إنَّ عددَ المرّاتِ التي تحدثُ فيها مِثْلُ هذه الدوراتِ في الثانيةِ الواحدةِ تُعرَفُ **بتردّدِ** الموجة.

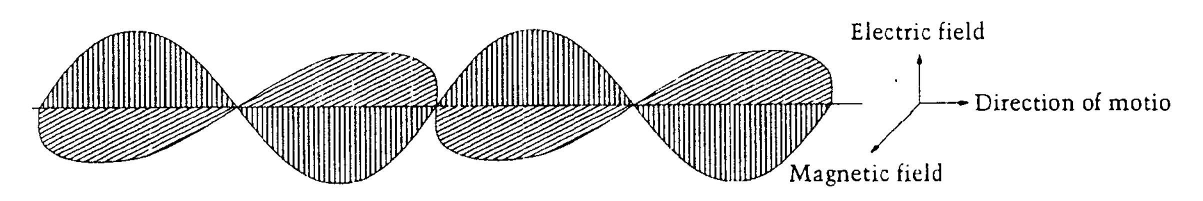
ومِن خصائصِ حركةِ الموجةِ البسيطةِ أنَّ تلك الارتفاعاتِ والانخفاضاتِ تتوزّع،

وفي أيِّ وقتٍ، بصورةٍ متساوية، وكما يظهرُ في الشكلِ ١,١١. إنّ المسافةَ ما بينَ أيِّ ارتفاعيْنِ، أو انخفاضيْنِ متتالييْنِ، تُعرَفُ بالطول الموجيِّ للموجةِ. وتَمَوْضُعُ نِقاط الصعودِ والنزولِ هذه، والطريقةُ التي تتموّجُ بها مع الوقت، هو الذي يُعطينا انطباعَ الموجةِ المتحركة. ويوضِّحُ الشكلُ ١,١١ هذا المبدأ. إنّ فتحاً وإغلاقاً مُشابهاً لمفاتيح أضويةِ النيون علىٰ لوحةِ الإعلانات يُعطينا انطباعاً بالحروفِ المتحركة.

وما ذلك الذي يتموَّجُ صُعوداً ونزولاً عندما تتحركُ موجةُ الضوءِ عبرَ الفضاء؟ لقد اعتقدَ العلماءُ، منذُ وقتٍ طويلٍ، أنَّ وَسَطاً ميكانيكياً ضروريٌّ لنشرِ الموجة. وعلىٰ سبيلِ المثال، فإنَّ الموجاتِ في المياه تتسبَّبُ في حدوث تحرّكاتٍ في الماء إلىٰ أعلىٰ وأسفل، كما أنَّ الموجاتِ الصوتيةَ تنشأُ عن ذبذباتٍ في الهواء، وتنتشرُ الموجاتُ المطاطيةُ مِن خلالِ اهتزازاتٍ في المادةِ الصلبةِ، وهكذا. فما هو ذلك الذي يتموّجُ عندما ينتشرُ الضوءُ عبرَ الفضاءِ؟ لقد افترِضَ بأنَّ الضوءَ موجةٌ تتحركُ عبرَ وسطٍ غيرِ مرئيٍّ أسموهُ **بالأثير aether**. ولكنَّ المحاولاتِ المتكررةَ للكشفِ عن هذا الوسطِ الغامض باءتْ بالفشل. ولقد جاء الجوابُ الصحيحُ مِن خلالِ أبحاثِ جيمس كلارك ماكسويل، عام ١٨٦٠، وهو يتلخّصُ في أنّ الموجةَ الصوتيةَ ليست إلاّ انتقالاً للاضطراباتِ الكهربائيةِ والمغناطيسيةِ المتموّجةِ عَبْرَ الفضاءِ، إنها الموجةُ **الكهرو (الإلكترو) مغناطيسية electromagnetic wave**. والارتفاعاتُ والانخفاضاتُ في هذه الحالة إنما هي في شِدَّةِ هذه الاضطراباتِ عَبْرَ المكانِ والزمان، وكما يظهرُ في الشكل ١,١٢. والطولُ الموجيُّ للضوءِ هو، وبكُلِّ بساطةٍ، المسافةُ ما بين ذُورتيْنِ متتاليتيْنِ للشِّدةِ الكهربائية، أو المغناطيسيةِ، في الفضاء.

وتنتمي الموجاتُ الضوئيةُ للألوان المختلفةِ إلىٰ مَدَياتِ أطوالٍ موجيّةٍ مختلفةٍ، وكلُّها غايةٌ في القِصَرِ بالنسبة إلىٰ مِعيارنا اليوميِّ، المِتْر. إنَّ وَحْدَةَ القياسِ المناسبةَ هنا هي **النانومتر nanometer**، وهو ما نحصَلُ عليه مِن خلالِ قِسمةِ المِترِ إلىٰ بليون (أي ألفِ مليونِ) جزءٍ. ويمتلكُ اللَّونُ الأحمرُ الطولَ الموجيّ الأكبرَ، وهو يَقَعُ عموماً بين ٦٢٠ و٧٧٠ نانومِتراً (nm)، بينما أنَّ للَّوْنيْنِ البنفسجيِّ والأزرقِ أطوالاً موجيّةً تتراوحُ بين ٣٩٠ و٤٥٠ نانومِتراً. أمّا الأطوالُ الموجيّةُ لِبقيةِ الألوان فهي تقعُ ما بينَ هذيْنِ.

ولكن ما الذي يكمُنُ وراءَ هذا النطاق؟ أَوَتَحُدُّ الطبيعةُ نفسَها بالمدىٰ ٣٩٠ ـ ٧٧٠ مِنَ النانومترات؟ إنَّ تحديدَ الطبيعةِ هذا لم تفرضهُ الطبيعةُ، في الحقيقةِ، ولكنْ فَرَضَتْهُ



الشكل ١,١٢ : موجةٌ كهرومغناطيسية. إنَّ الاضطراباتِ الكهربائيةَ والمغناطيسيةَ المتموجَةَ يتمثّلُ كلٌّ منها بمجموعةٍ من الخطوطِ المتوازية. إنَّ الاضطراباتِ الكهربائيةَ والمغناطيسيةَ عموديّةٌ واحدها علىٰ الآخر، وهي عموديةٌ أيضاً علىٰ اتجاهِ امتدادِ الموجة.

وظائفُ (فَسْلَجَةُ) الأعضاءِ البشرية. وفي الحقيقةِ، فإنَّ في الطبيعةِ أشكالاً أخرىٰ مِن الأمواجِ الكهرومغناطيسية، لا تُدركُها العينُ البشريةُ[1]. وعلى سبيلِ المثال، فإنّ الموجاتِ التي هي في الجهةِ الأطول لِلّونِ الأحمر تُعرَفُ بالأشعةِ **تحت الحمراء infrared**، بينما تُدعىٰ تلك التي هي في الجهةِ الأقصر للّونِ البنفسجيِّ بالأشعة **فوق البنفسجية ultraviolet**. ويُرينا الشكلُ ١,١٣ أنواعَ الأشعةِ الكهرومغناطيسيةِ المختلفةِ، مُتفاوتةً ما بينَ الأمواجِ الراديوية، التي تمتلكُ أكبرَ طولٍ موجيٍّ، وبينَ أشعّةِ غاما التي تمتلكُ الطولَ الموجيَّ الأقصرَ. وعندما نقومُ بفتح أجهزةِ الراديو النقّالة «الترانزستور» لِسماعِ برامجِ الراديو، فإنَّ الأمواجَ الراديويةَ تقومُ بنقلِها إلينا مِن محطّةِ الراديو.

ما هي العلاقةُ بين الترددِ والطولِ الموجيِّ؟ يُمكنُنا أن نرىٰ مِن الشكلِ ١,١١ أنّ الشكلَ الموجيَّ ينتشرُ ويمتدُّ، في أثناءِ الدورةِ، بمسافةِ طولٍ موجيٍّ واحد. إنَّ التردّدَ يُنبئُنا عن عددِ الدوراتِ التي تحدثُ في كلِّ ثانية. وهكذا، فإنّ الشكلَ الموجيَّ سوف يتقدّمُ، في الثانيةِ الواحدةِ، مسافةً تحصلُ عليها مِن حاصلِ ضربِ التردّدِ في الطولِ الموجيّ. ولمّا كانت المسافةُ التي تسيرُ فيها الموجةُ الضوئيةُ في الثانيةِ الواحدةِ ليست إلاّ سرعةَ الضوءِ ذاتَها، فإنّ حاصلَ ضربِ التردّدِ في الطولِ الموجيّ يُعطينا سرعةَ الضوء. ولقد أظهرَ ماكسويل أنّ **سرعةَ الضوءِ عَبْرَ الفضاءِ الفارغِ هيَ ذاتُها لأيِّ ضوءٍ، ومِن أيِّ طولٍ موجيٍّ كان**. وتَبلغُ هذه القيمةُ ٣٠٠٠٠٠ كيلومترٍ في الثانية تقريباً.

---

(١) لا بل إن ٩٠٪ من مادة الكون هي مادةٌ «مظلمة» dark matter، أي غيرُ مرئية. ﴿فلا أقسم بما تبصرون. وما لا تبصرون﴾ [الحاقة: ٣٨ و٣٩].

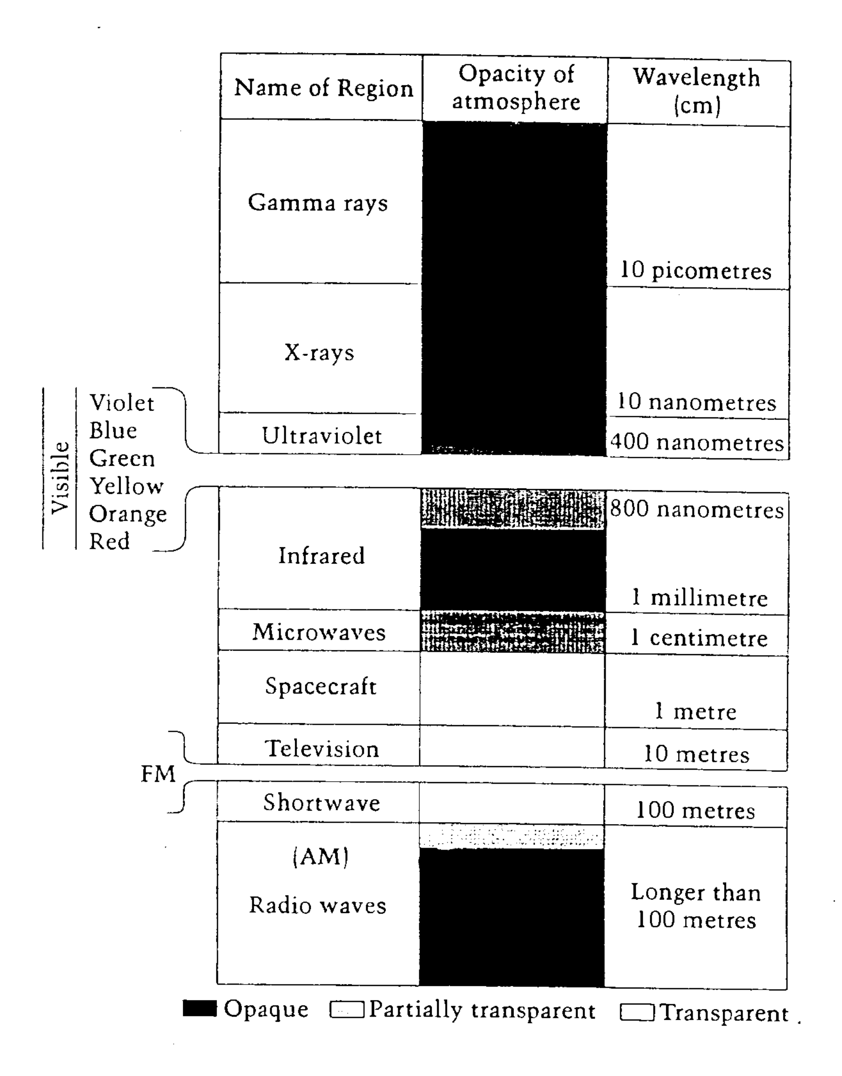
وهكذا فإذا ما عَرَفْنا الطولَ الموجيَّ للضوءِ لأمكنَ لنا أن نحسِبَ تردّدَهُ، باستخدامِ القاعدةِ البسيطة جداً التي ذَكَرْناها. وعلىٰ سبيلِ المثالِ، فإنَّ طولاً موجيّاً من ٥٠٠ نانومترٍ (للضوءِ الأخضر) يملِكُ تردّداً يبلغُ حوالىٰ ٦٠٠ مليونِ مليون! وهذا يعني أنّ أيّةَ موجةٍ لضوءٍ أخضر تمرُّ عَبْرَ الفضاءِ الخالي فإنّ الاضطراباتِ الكهربائيةَ والمغناطيسيةَ الصغيرةَ المُصاحبةَ لها سوف تُحدِثُ ذبذباتٍ إلىٰ الأعلىٰ والأسفلِ، ٦٠٠ مليون مليون مرّةٍ في كلِّ ثانية (وخلالَ ذبذبةٍ واحدةٍ مِن هذا القبيل، فإنَّ الموجةَ تتقدمُ ٥٠٠ نانومترٍ، ولذا فإنها سوف تكونُ قد تقدّمت، في الثانيةِ الواحدةِ، أي خلالَ ٦٠٠ مليون مليون ذبذبة، مسافةً تبلغُ ٥٠٠ نانومتر × ٦٠٠ مليون مليون = ٣٠٠٠٠٠ كيلومتر).

وإذا ما عُدنا إلىٰ جوِّ الأرض، وكيفيةِ تعامُلِه مع أشكال الضوءِ المختلفة لَتذكّرْنا بأنه يحجُبُ معظمَ الأطوالِ الأخرىٰ مِن الموجاتِ، باستثناءِ الضوءِ المرئيِّ، والموجاتِ الراديويةِ، وبعضِ الحُزَم الضيّقةِ من الأشعةِ تحتَ الحمراء (انظر الشكل ١,١٣). وحتىٰ نُراقبَ الكونَ بِمَراقِبَ يُمكنُها استلامُ هذه المَدَياتِ الأخرىٰ مِن الطولِ الموجيِّ، فإننا نحتاجُ إلىٰ أن نرتفعَ بعيداً في الغلافِ الجويّ أو فوقَه. ويتمُّ إطلاقُ مثلِ هذه المَراقِبِ في بالوناتٍ، أو صواريخَ، أو أقمارٍ صناعيةٍ. ولسوفَ نرىٰ لاحقاً في هذا الكتابِ بأنَّ هذه المَراقِبَ تُساعدُنا علىٰ اقتناصِ عجائبَ أخرىٰ كثيرةٍ للكون.

لماذا تتلألأُ النجوم؟

إنَّ الأثرَ الثانيَ للجوِّ، علىٰ الأشكالِ النجمية التي أشرنا إليها سابقاً، هو اهتزازُ وعَدَمُ ثباتِ هذه الأشكال. ويُظهِرُ لنا الشكلُ ١,٧ كيف أنّ أشعةَ الضوءِ تنحني عند دخولها مِن وَسَطٍ (الهواء) إلىٰ آخَرَ (الزجاج). إنَّ تأثيرَ الانكسارِ هذا، وبِشَكْلٍ هو أدَقُّ علىٰ الملاحظة، يعملُ في الجوِّ علىٰ الضوءِ الذي يدخلُه مِن الأعلىٰ. وبينما تزدادُ كثافةُ الجوِّ كلَّما اتجهنا نحوَ الأسفلِ، فإنَّ الضوءَ، في حقيقةِ الأمرِ، يكونُ قد مَرَّ عَبْرَ وَسَطٍ مُتغيّرٍ، وهو ما يؤدي إلىٰ حدوثِ انكسارٍ مُتدرِّج طفيف. وهكذا فإنَّ الأشعةَ تُغيِّرُ مِن اتجاهها بدرجةٍ طفيفةٍ جدّاً، لِضآلةِ درجةِ الانكسار، وذلك يؤدِّي بالخيالِ النجميِّ إلىٰ أنْ ينحرفَ عن موضعِه قليلاً.

ولْنتخيّلْ تيّاراتِ الهواءِ في الجوِّ، وهي تُغيِّرُ مِن تَوَزُّعِ الكثافةِ فيه قليلاً، مُسبِّبَةً اهتزازَه. إنَّ هذا التأثيرَ، وهو بالِغُ الضآلةِ أيضاً، يؤدي إلىٰ اهتزازِ خيالاتِ النجوم. ولذا فإننا نرىٰ، بَدَلاً من النجمِ الثابتِ، النجمَ **المتلألأ** **twinkling star**. إنَّ التلألُؤَ الذي



الشكل ١,١٣: الموجاتُ الكهرومغناطيسية، في مَدَياتٍ مختلفةٍ من الطولِ الموجيّ. لاحظْ أنَّ الضوءَ المرئيَّ، الذي يُمكنُ لأعيننا أن تراهُ، يَقَعُ في منتصَفِ المدىٰ، وتُوافِقُ الأطوالُ الموجيةُ الأكثرُ استطالةً الموجاتِ الراديويةَ، بينما يُوافِقُ الأقصرُ منها أشعةَ غاما. ويُرينا هذا الجدولُ أيضاً درجةَ امتصاص الجوِّ لهذه الموجاتِ القادمةِ مِن الفضاءِ الخارجيِّ.

يُكسِبُ النجمَ ذلك المنظرَ الأخّاذَ في عينِ الشاعرِ يزيدُ مِن صعوبة دراسةِ الفلكيِّ لهذه الأجرام.

وللتغلّبِ علىٰ هذه الصعوبةِ، فإنَّ الوسيلةَ المباشِرةَ تكمنُ، بالطبع، في أن نصعدَ فوقَ الغلافِ الجويِّ المهتزِ، ونضعَ مَراقِبَنا هناك. وهذه هي المِيزةُ التي يمتازُ بها مِرْقابُ

هابِل الفضائيُّ Hubble Space Telescope، عن أمثالِه علىٰ سطحِ الأرض. ولا يتلافىٰ هذا المِرقابُ بَهْتَ الخيالاتِ الناتجَ عن الغبارِ الجويّ وحَسْبُ، بل إنهُ يتلافىٰ أيضاً ضبابيّتها وعَدَمَ وضوحِها. وبالطبعِ، فلسوف تَبدو الخيالاتُ النجميّةُ ساطعةً وواضحةً مِن علىٰ سطحِ القمرِ، حيثُ لا يوجدُ هناكَ مِن غلافٍ جويٍّ (انظر الشكل ١,١٤).

علىٰ أنّنا قد بدأْنا، في السنواتِ الأخيرةِ، وبفضلِ التطوّرِ التقنيِّ، باستخدامِ المَراقِبِ الموجودةِ علىٰ سطحِ الأرض، والتي تستخدمُ ما يُعرَفُ بالبصرياتِ **التكيُّفيةِ adaptive** optics. ويَتمُّ، في هذهِ التقنية، تَعَقُّبُ التغيُّراتِ الجويةِ، وتذبذُبِ مِرآةِ العاكسِ، حتىٰ يتمَّ تعديلُها. ومِن خلالِ مِثْلِ هذهِ الإجراءاتِ التصحيحيّةِ يمكنُ الحصولُ علىٰ تحسُّنٍ كبيرٍ في ثباتِ الصورة.

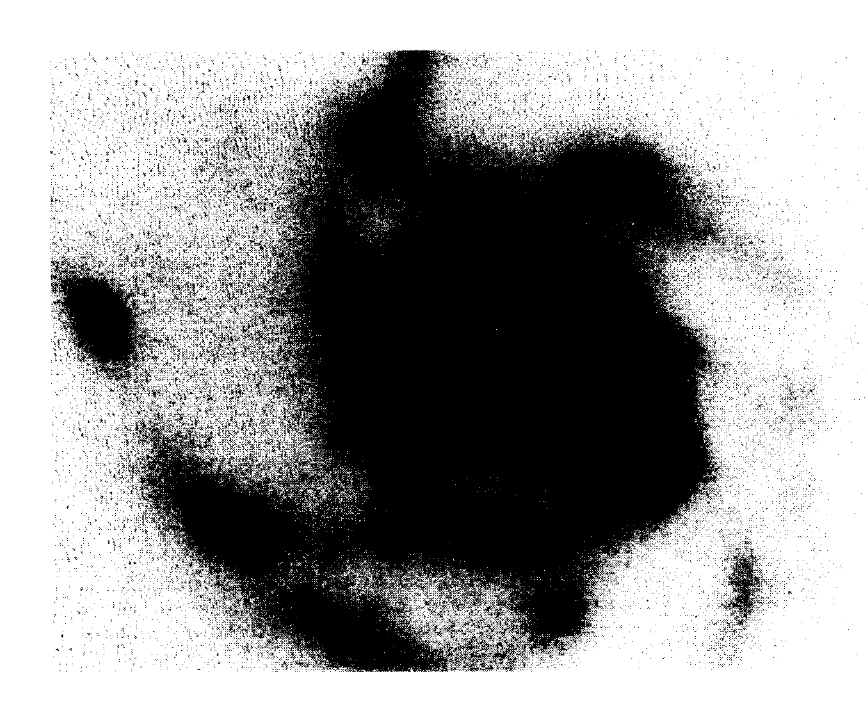
لماذا تبدو الأرضُ ثابتةً، عندَ النظرِ إليها مِن القمر؟

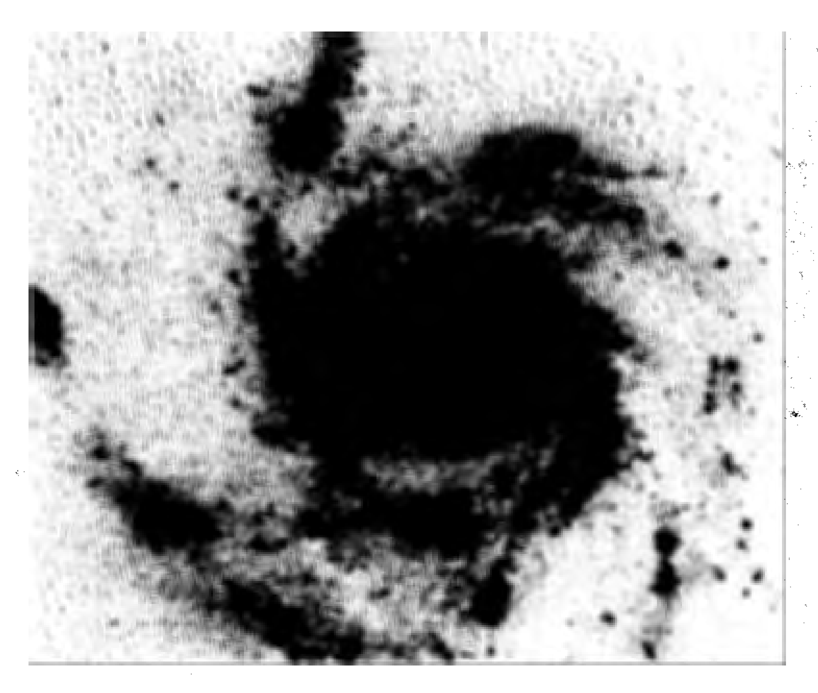
نعودُ، بعدَ تنكُّبٍ طويلٍ، إلىٰ مشهدِ الأرضِ كما نراهُ مِن القمرِ (الشكل ١,١٠). نحنُ نفهمُ الآنَ السببَ في أنه واضحٌ منتهىٰ الوضوحِ، حتىٰ إننا يُمكنُنا أن نتبيَّنَ بعضَ مَعالِم سطحِ الأرضِ، وخصوصاً زُرقةَ المحيطاتِ. ولكنْ إذا ما أقَمْنا علىٰ مُراقبتِها لِساعاتٍ قلائلَ، فإنها لن تُغيِّرَ مِن مكانِها في السماء. وهذا سلوكٌ غريبٌ، لأننا قد تَعَوَّدْنا هنا، من علىٰ سطحِ الأرضِ، أنْ نرىٰ القمرَ وهو يسيرُ عَبْرَ السماءِ مِن شرقٍ لِغرب.

وليسَ مِن العسيرِ أن نفهمَ سببَ هذه الظاهرةِ الغريبة. فَلْنَلْحَظْ وجهاً مُهمّاً مِن حركاتِ القمرِ حولَ الأرض. إذْ بينَما يتحرّكُ القمرُ في مَسارٍ دائريٍّ، فإنه يلفُّ حولَ مِحْورِهِ أيضاً، وبطريقةٍ يكونُ فيها الوجهُ ذاتُه منه مُواجِهاً دَوْماً للأرض. وهذا هو السببُ في أنّ الجهةَ الأخرىٰ مِن القمرِ قد ظلّتْ محجوبةً عنّا نحنُ أهلُ الأرضِ، حتىٰ أمكنتْنا التِقنيّةُ الفضائيّةُ مِن إرسالِ السُّفُنِ الفضائيةِ إلىٰ الجهةِ الأخرىٰ منه. ويُرينا الشكلُ ١,١٥ صورةً التُقِطَتْ مِن قِبَلِ سفينةٍ فضائيةٍ أُرسِلَتْ حولَ الجهةِ الأخرىٰ من القمر.

ويشبهُ سلوكُ القمرِ هذا سلوكَ اللاعبِ الرياضيِّ الذي يعدو في دائرةٍ حولَ ساريةِ العَلَم. ولو كان اللاعبُ يعدو باتجاهِ حركةِ عقاربِ الساعةِ فإنَّ ذراعَه اليُمنىٰ سوف تكونُ أقرَبَ إلىٰ الساريةِ دائماً. وللحصولِ علىٰ ذلك، فإنّ اللاعبَ يعدو طَوالَ الوقتِ حولَ مِحْوَرٍ عموديٍّ، مُكمِلاً دورةً كاملةً بَعدَ العَدْوِ حولَ الدائرةِ مَرَّةً واحدة. وهكذا فَلَسَوْفَ يَجِدُ العَدّاءُ ساريةَ العَلَمِ بالاتجاهِ نفسِه دائماً، أي مِن علىٰ يمينِه.

ويفعلُ القمرُ الشيءَ ذاتَه، حيثُ إنّه سوفَ يكونُ مرئيّاً بالاتجاه ذاتِه دائماً، ولذا **فإذا**





الشكل ١,١٤ : تَظهَرُ ضَبابيّةُ وعَدَمُ وضوحِ الصورةِ، بسببِ الدُّواماتِ الجويّةِ في هذه المُحاكاةِ، وبشكلٍ مُبالَغٍ فيه. ونرىٰ في الشكلِ الأعلىٰ صورةً لمجرّةٍ حلزونيةٍ حصلْنا عليها مِن مِرْقابِ هيل Hale ـ خمسةَ أمتارٍ، أمّا الشكلُ السُّفليُّ فيُرينا الصورةَ ذاتَها بِمرقابِ الفضاءِ هابل (Hubble Space Telescope (HST.



الشكل ١,١٥ : الجهةُ البعيدةُ من القمر، وقد صوّرَتْها المركبةُ الفضائيةُ الرّوسيةُ ليونا ـ ٣ Luna 3، عامَ ١٩٥٩، أوّلَ مرّة. يلفُّ القمرُ حول محورِه بحيثُ إنّ الوجهَ الواحدَ ذاتَهُ مِن القمر يُواجِهُ الأرضَ علىٰ الدوامِ بينما هو يدورُ حولها.

كانت الأرضُ مرئيّةً مِن القمرِ، فإنّها سوفَ تُرىٰ في الاتجاهِ ذاتِه دائماً. وكلمةُ «إذا» هنا مُهمّةٌ، إذْ لو حدثَ أننا كُنّا علىٰ «الجهةِ الأخرىٰ» مِن القمرِ، والبعيدةِ عن الأرضِ، **فإننا لن نرىٰ الأرضَ أبداً**.

مَشاهِدُ رائعةٌ في المنظومةِ الشمسية

تبدو الأرضُ، إذا ما نَظرْنا إليها مِن علىٰ سطحِ القمرِ، أكبرَ بحوالىٰ ٤ مرّاتٍ مِن القمرِ عندَ النظرِ إليه مِن الأرض. وهذا مِثالٌ واحدٌ وَحَسْب، وهو مثالٌ مُتواضعٌ نسبياً، علىٰ المَشاهِدِ المختلفةِ الممكنةِ في هذه المنظومةِ الشمسيةِ بِأسْرِها، والتي تتألّفُ مِن تِسْعةِ كواكبَ سيّارةٍ وتوابِعها كلِّها. وثَمّةَ مشاهِدُ أكثرُ إثارةً مِمّا تَعَوّدْنا علىٰ رؤيتِهِ في الأرضِ تنتظرُنا لو كُنّا نَقْدِرُ علىٰ أنْ نقتنصَها.

وفي مُحاضَرةٍ بعنوانِ «حظّ العالِم الفلكيّ»، تحدَّثَ العالِمُ الفلكيُّ الطبيعيُّ ويليم هـ. ماكري عن عواملَ تَصادُفِيَّةٍ عديدةٍ تَدَخَّلَتْ في عِلْم الفَلَكِ astronomy. وابتدأَتْ محاضرتُهُ بمناقشةِ الأحجامِ الظاهريّةِ للشمسِ والقمر كما نراها مِن الأرض، إذ إنّ قُرْصَيّ الشمسِ والقمرِ يبدوان لنا بالحجم ذاته، وهما قد يُعطيانِ الانطباعَ بأنهما مُتساويا الحجم. ولكنَّ الحقيقةَ هي أنَّ قُطرَ الشمسِ هو أكبُر بحوالىٰ ٤٠٠ مرّةٍ مِن قُطرِ القمر. ولكنْ لَمّا

كانتِ الشمسُ أبعدَ مِنّا أكثرَ بكثيرٍ مِن القمرِ، فإنَّ حجمَها الكبيرَ يبدو وقد صَغُرَ إلىٰ ما يَكادُ أنْ يُماثِلَ حجمَ القمرِ بالضبط. وحتىٰ نُدرِكَ دَوْرَ المصادَفةِ[1] في ذلكَ فإنَّ الشكلَ ١,١٦ يساعدُنا علىٰ ذلك، حيثُ إنّه يُوضِّحُ لنا الأوجُهَ الهندسيةَ لهذا الموقفِ.

ويُبَيِّنُ لنا هذا الشكلُ السببَ الكامنَ وراءَ ذلكَ الانطباعِ الذاتيّ لدينا بمدىٰ كِبَرِ الجسم الذي يبدو به. ويُرىٰ في هذا الرسم جسمٌ دائريٌّ مِن قِبَلِ المشاهدَيْنِ «أ» و«ب»، حيثُ يَقفُ (أ) علىٰ مَقْرُبَةٍ منه، ويقفُ (ب) بعيداً عنه. ومِنَ الواضحِ أنَّ الجسمِ يبدو للشخص «أ» أكبرَ بكثيرٍ مِمَّا يبدو عليه لِـ «ب».

ويعودُ السببُ في ذلكَ إلىٰ أنَّ الصورةَ التي تتكوَّنُ علىٰ شبكيةِ عينِ المُشاهدِ «أ» هي أكبر بكثيرٍ مِن تلكَ التي تتكوّنُ علىٰ شبكيةِ المشاهدِ «ب». ويتمُّ تحديدُ هذه الصورةِ، أساساً، بالزاويةِ المقابلةِ للجسم الكُرويِّ في العين. وكما نرىٰ في الشكلِ ١,١٦، فإنَّ هذهِ الزاويةَ هي أكبرُ بكثيرٍ للمُشاهدِ «أ» مِمّا هي للمُشاهدِ «ب». ويُمكنُ الحصولُ علىٰ قياسٍ تقريبيٍّ للزاويةِ المُقابلةِ، لِمُشاهدٍ ما، لهذا الجسم، بحسابِ نسبةِ قُطرِ الجسم عمودياً علىٰ خطِّ رؤيتهِ، مقسوماً علىٰ بُعدِه عن الرّائي. وفي الحقيقةِ فإنّ هذا التقريبَ ممتازٌ عندما تكونُ الزاويةُ صغيرة.

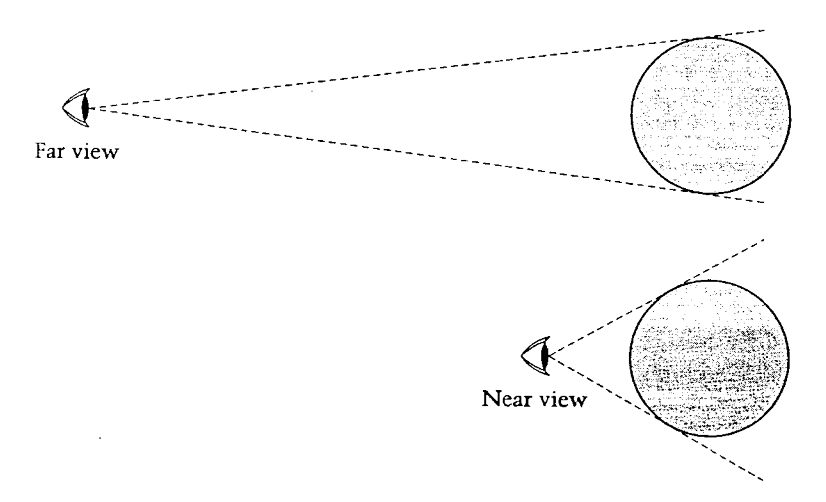
ولقد لاحَظْنا، في حالةِ الشمسِ والقمرِ، أنَّ الامتدادَ الطُّوليَّ للشمسِ يبلغُ ٤٠٠ ضِعْفٍ عن ذلكَ الذي للقمر. ويتصادفُ أنّ بُعدَنا عن الشمسِ، مِن مكانِنا الذي نحنُ فيه، يبلغُ أيضاً ٤٠٠ ضِعْفٍ لِبُعدِنا عن القمرِ[2]. وهكذا، ومِن خلالِ القاعدةِ التي توصَّلْنا إليها تَوّاً، فإنّ حجمَ القمرِ الظاهريَّ قريبٌ جدّاً مِن حجم الشمسِ الظاهريّ. ولقد كانَ هذا هوَ الاتّفاقُ التصادفيُّ[3] الذي كان يُشيرُ إليه ويليم ماكري.

ولأنّ القمرَ يُماثِلُ الشمسَ، بدرجةٍ فائقةٍ، في حجمهِ الظاهريِّ، فإنَّ مِن المُمكن للقمرِ، في أحوالٍ نادرةٍ، أن يَحجُبَ الشمسَ كُلِّيَةً، مُسبِّباً حدوثَ كسوفٍ eclipse كُلّيٍّ للشمس، ولكنَّ هذه المناسباتِ نادرةُ الحدوث.

---

(١) بل هو تقديرُ الخالقِ سبحانَهُ ﴿الذي أحْسَنَ كلَّ شيءٍ خلقه﴾ [السجدة: ٧]، ﴿فتبارك اللّه أحسن الخالقين﴾ [المؤمنون: ١٤].

(٢) و(٣) ليس في كلِّ ما خَلَقَ اللّه تعالىٰ مِن مصادفةٍ ما، بل كلُّ شيءٍ يسيرُ بسُنَنٍ موزونةٍ وقوانينَ محكَمَةٍ دقيقة، ونظام يتَّصِفُ بالجلال والجمال. انظرْ موضوع «نظامٌ وجمالٌ في كلِّ مكانٍ وزمان في الكون»، كتاب أسرار الكونَ في القرآن، للسعدي، دار الحرف العربي، بيروت، ط (٢)، ١٩٩٩، ص (٢٨١).

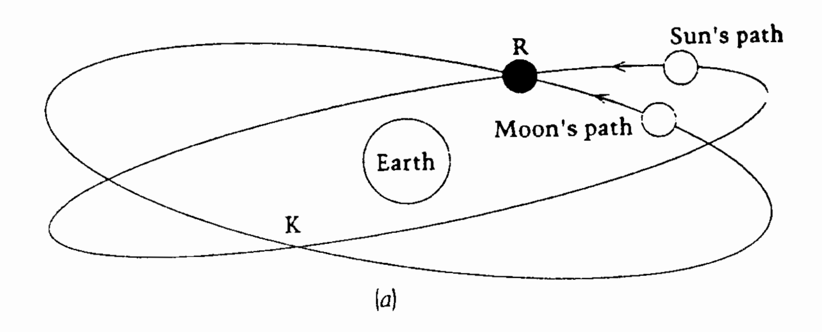


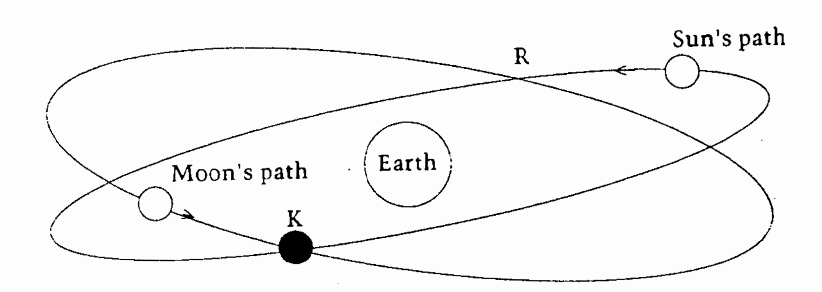
الشكل ١,١٦ : إنّ الزاويةَ المُقابلةَ لجسم كرويٍّ، في نقطةٍ قريبةٍ للمشاهدةِ هي أكبرُ بكثيرٍ مِن تلكَ التي تعودُ إلىٰ نقطةٍ بعيدة. وتُحدِّدُ هذهِ الزاويةُ حجمَ الجسم الظاهريِّ الذي يبدو للمُشاهِدِ في أيٍّ مِن هذه النقاط، وهذا هو السببُ في أنَّ الأشياءَ تبدو أكبَرَ حجماً عندَ النظرِ إليها عَن قُرْب. وفي الرسم، فإنّ المنظرَ البعيدَ هو للمشاهدِ «ب»، والمنظرُ القريبُ هو للمشاهد «أ».

وكما يَظهَرُ لنا مِن الشكلِ ١,١٧ ، فإنَّ الشمسَ، والأرضَ، والقمرَ لا تتحركُ بالنسبة إلىٰ بعضِها البعضِ في المستوىٰ ذاتِه. وهناكَ ما بينَ المستوىٰ الذي تدورُ فيه الأرضُ حولَ الشمسِ، والمستوىٰ الذي يدورُ فبه القمرُ حولَ الأرضِ زاويةٌ صغيرةٌ تبلغُ نَحواً مِن خَمْسِ دَرَجات. وهذا هو السببُ في أنّ المناسَباتِ التي تكونُ فيها الشمسُ والقمرُ في خطٍّ واحدٍ تماماً، بالنسبة إلىٰ الأرض، نادرةٌ نسبياً.

وكما نرىٰ في الشكل ١,١٧ ، فإنَّ الكسوفَ، أو الخسوفَ، يقعُ عندما تكونُ الشمسُ والقمرُ في نِقاطٍ تقعُ علىٰ خطِّ تقاطُعِ مُستويَيْهما. وتُعرَفُ هذه النقاطُ بِنقاطِ تَقاطُعِ المدارَيْن، أو **نقاطِ اللّقاء nodes**.

وبسببِ ندرَةِ حدوثِ الكسوفِ الشمسيِّ الكُلِيِّ، والذي لا يحدثُ إلاّ إذا حَجَبَ القمرُ وجهَ الشمسِ، فلقد ألهمَ ذلكَ عُقولَ الناسِ بالقَصَصِ الشعبيّةِ المُتَخيَّلَةِ. ومِن الناحيةِ الأخرىٰ، فلو كان حجمُ القمرِ الظاهريُّ أكبرَ بكثيرٍ مِن حجم الشمسِ الظاهريّ، أو كان القمرُ أقربَ قليلاً إلىٰ الأرضِ مِمّا هو عليه، فلقد كان يُمكنُ أن يكونَ وقوعُ الكسوفاتِ الشمسيةِ أكثرَ حدوثاً ولَفَقَدَ مِن أهميتِهِ التي تعودُ إلىٰ نُدرةِ حدوثِه! ولو كان القمرُ، مِن الناحيةِ الأخرىٰ، أصغرَ مِن حجمهِ الذي هو عليه بِبضعةِ أعدادٍ قليلةٍ في المائةِ

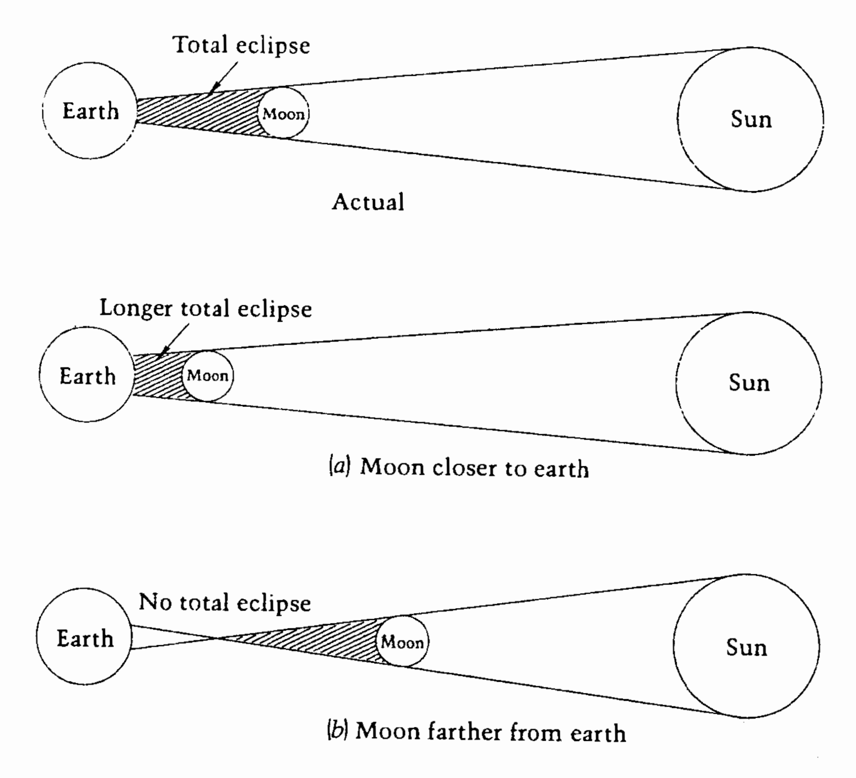




الشكل ١,١٧ : إنّ المستويَيْنِ اللّذيْنِ يدورُ فيهما القمرُ حولَ الأرض، والأرضُ حولَ الشمس، يميلانِ واحدهما علىٰ الآخر بدرجة صغيرة. ويُحدِّدُ خطُّ تقاطعِهما RK اتجاهاتِ نِقاطِ اللقاء (نِقاطِ تَقاطُعِ المدارَيْن). ويقعُ القمرُ، عند كسوفِ الشمسِ، في A بينَ الشمس والأرض. أمّا عندَ خُسوفِ القمرِ فإنَّ الأرضَ تقعُ بين الشمسِ والقمر، وكما في B.

وحَسْب، أو كانَ أبعدَ قليلاً عن الأرضِ مِن مَوْقعِهِ الذي هو عليهِ، إذاً ما كانَ بالإمكانِ رؤيةُ حدوثِ لأيِّ كسوفٍ شمسيٍّ علىٰ الإطلاق. ويُظهِرُ الشكلُ ١,١٨ (أ) و(ب) بُرهانَ ذلك. ومِن بينِ الكواكبِ السيّارةِ كلِّها في منظومتِنا الشمسيةِ وتوابِعها، فإنَّ منظومةَ الأرضِ ـ الشمس هي الوحيدةُ التي تتمتّعُ بهذه المصادفةِ الحاسمة(١). ولْنتمهَّلْ قليلاً ولْنَنْظُرْ فيما عسىٰ أن نراهُ مِن كسوفٍ أو خسوفٍ لو كنّا علىٰ سطحِ القمر. هل إننا سوف نرىٰ الشمسَ وقد كَسَفَتْها الأرضُ، أم نرىٰ الأرضَ وقد كَسَفَها القمرُ؟

(١) إنَّ تَشابُهَ حجم الشمسِ والقمرِ، في رأيِ العين، إنّما يَشُدُّ الانتباه شَدّاً إلىٰ التنظيم الإلٰهيِّ الدقيقِ في بُعْدَيْهما عنا، إذ إنَّ قُرْصَ الشمسِ هو أكبرُ من قُرْصِ القمر بـ ١٦٠٠٠٠٠مرّةٍ، ولكنَّ بُعْدَيْهما عنا (١٥٠ مليون كيلومترٍ للشمس، و٣٨٥ ألفَ كيلومترٍ للقمر) هما اللذان جعلا منهما متساويَيْن، ظاهرياً. إنَّه تقديرُ الخالقِ المُقَدِّرِ سبحانه. د.س



الشكل ١,١٨ : (أ) لو كان القمرُ أكبرَ في حجمهِ أو أقربَ إلىٰ الأرض، فإذاً لَغطّىٰ ظِلُّهُ الشمسَ بسهولةٍ أكبرَ، ولأدّىٰ إلىٰ حدوثِ كسوفاتٍ للشمسِ أكثرَ بكثير. علىٰ أنّه لو كانَ أصغرَ حجماً أو أبعدَ عن الأرضِ، وكما في (ب)، فلن يكونَ في إمكانِه أنْ يَحْجُبَ الشمسَ كُلّيَةً، وهكذا فإنّ الكسوفَ الشمسيَّ سوف يصيرُ نادراً أو حتىٰ غيرَ مُمكنِ الحدوث.

ولقد عَلِمْنا بأنّ الأرضَ تبدو، عندَ النظرِ إليها مِن القمرِ، أكبرَ بأربعِ مَرّاتٍ مِن القمرِ الذي نراهُ مِن الأرض. وهكذا فإنّ الزاويةَ المُقابلةَ للأرضِ مِنَ القمرِ سوف تكونُ أكبرَ (بأربعِ مَرّاتٍ تقريباً) مِمّا لو كانت تُقابلُ الأرضَ مِن الشمس. ولو كُنّا علىٰ سطحِ القمرِ، وقُدِّرَ للأرضِ أن تصيرَ بين الشمسِ والقمر، فَلَسَوْفَ يكونُ لَدَيْنا كسوفٌ شمسيٌّ كامل. ويَحدُثُ ذلكَ، بالطبعِ، عندما يكونُ ثَمَّةَ خُسوفٌ للقمرِ مَرْئِيّاً مِن الأرض! ولأنَّ حجمَ الأرضِ الظاهريَّ، مِن علىٰ سطحِ القمرِ، أكبرُ بأربعِ مَرّاتٍ مِن ذلك الذي للشمس، فلَسَوْفَ تكونُ مِثلُ هذه الكسوفاتِ أكثرَ حدوثاً مِن كسوفِ الشمس لِأَهلِ الأرضِ، وستدومُ لِفتراتٍ أطولَ بكثير. ولكنّها لن تكونَ بِتلكَ الإثارةِ التي تُصاحِبُ كسوفاتِ الشمسِ الكلّيةَ علىٰ الأرضِ، فلماذا؟

لا بُدَّ أن نتذكَّرَ هنا أنَّ السماءَ، وبسببِ بعثرةِ غلافِ الأرضِ الجويِّ لضوء الشمسِ، مغمورةٌ بضوءِ الشمسِ الباهر، في الأيام الاعتيادية. أمَّا عندَ حدوثِ كسوفٍ للشمسِ، فإنَّ الظُّلْمَةَ تَغمُرُ السماءَ لفترةٍ وجيزةٍ جدّاً. وهذا مَشْهَدٌ مُثير، حيثُ تَظْهَرُ نجومُ الليل، وتَهْبِطُ درجةُ الحرارةِ، كما يبدو الإكليلُ corona المُحيطُ بقُرصِ الشمسِ المحجوبِ عنّا مُتوهِّجاً. أمّا علىٰ سطحِ القمرِ، فإنَّ السماءَ مُظلمةٌ دوماً، وسواءٌ أكانتِ الشمسُ مُشرِقةً أمْ لم تَكُنْ. وهكذا فإنَّ حجبَ منظرِ الشمسِ لن يكونَ بالمَشهدِ المُثيرِ علىٰ القمرِ مثلما هو علىٰ الأرض.

وماذا عن كسوفٍ أرضيٍّ يَشْهَدُه ذلكَ الذي علىٰ سطح القمر؟ سوف يحدثُ كسوفٌ كُلِيٌّ عندما يُحيطُ ظِلُّ القمرِ بالأرض، أي عندما يكونُ هناكَ كسوفٌ شمسيٌّ علىٰ الأرض. ولكنَّ الأرضَ هي أكبرُ بكثيرٍ مِنْ أنْ تَقَعَ كُلِّيَةً داخلَ ظِلِّ القمرِ المخروطيّ، ولذا فإننا لن نرىٰ إلاّ كسوفاً جُزئياً جدّاً للأرض.

وهكذا، وكما لاحظَ ويليم ماكري، فإنَّ الفلكيّينَ لَمحظوظونَ حَقّاً في أنّ الشمسَ والقمرَ يبدُوانِ، في السماء، بالحجمِ ذاتِهِ تقريباً. ولا يوجَدُ مِثْلُ هذا الاتِّفاقِ في أيِّ مِن الكواكبِ السَّيارةِ الأخرىٰ، ولا في أقمارِها التابعةِ لها. وثَمَّةَ مَشاهِدُ مُثيرةٌ لِبعضِ الكواكبِ السَّيارةِ الأخرىٰ، ويُمكِنُ رؤيتُها بِصورةٍ اعتيادية.

نظرةٌ مِنْ «آوْ» View from Io

لَسَوْفَ نتخيّلُ الآنَ مثلاً بارزاً علىٰ ما ذكرناه. ويتعيّنُ علينا، مِن أجْلِ ذلكَ، أن نقتربَ مِن ذلكَ الكوكبِ السَّيّارِ، المُشتري Jupiter.

والمشتري هو أكبرُ كوكبٍ سيّارٍ في المنظومةِ الشمسية، إذْ يبلغُ قطرُه نحواً مِن اثْنَيْ عَشَرَ ضِعْفِ قُطْرِ الأرض، وهكذا فإنَّ مِساحَتَهُ السطحيةَ تَزيدُ علىٰ مِساحة الأرضِ بـ ١٥٠ مرّةٍ، بينما يَصِلُ حجمه إلىٰ ما يَقْرُبُ مِن حجمِ ٢٠٠٠ كرةٍ أرضيةٍ تقريباً!

وللمشتري ١٦ قمراً تابِعاً. والقمرُ «آوْ» Io هو أحَدُ الأقمارِ الداخليةِ للمشتري، ويكادُ أن يكونَ حجمُه بقَدْرِ حجمِ قمرِنا، وهو يدورُ حولَ المُشتري علىٰ بُعْدٍ يبلغُ عُشْرَ المسافةِ ما بينَ الأرضِ وقمرِها. فما عَسىٰ مَشْهَدَ المشتري أن يكونَ لو نظرْنا إليه مِن فوقِ أُفُقِ القمرِ «آوْ»؟ مِثْلَما أنّ الأرضَ تبدو ثابتةً لا تتحركُ بالنسبةِ إلىٰ الناظرِ إليها مِن القمرِ، فَلَسَوْفَ يبدو المُشتري ثابتاً لا يريمُ فوقَ «آوْ». ولكنْ كم سيكونُ حجمُه؟ إنَّ قُطرَ المشتري لَهُوَ أكبرُ مِن قطرِ الأرضِ بأحَدَ عشَرَ ضِعفاً، ونحنُ نتذكرُ بأنّ الأرضَ تبدو أكبرَ

مِنَ القمرِ بأربعةِ أضعاف. **إنَّ الحساباتِ تُشيرُ إلىٰ أنّ المشتري سوف يبدو، بالنسبةِ إلى الناظرِ إليه مِن «آوْ»، أكبرَ مِن قمرِنا منظوراً إليه مِن الأرض!**

ونرىٰ في الشكل ١,١٩ صورةً لِآوْ جَنْبَ المشتري، وهو ما قد يُعطي فكرةً عن ضخامةِ حجمِ هذا الكوكبِ السّيارِ فيما لو نظرْنا إليه مِن أحَدِ توابعهِ القريبة.

وبطبيعةِ الحالِ، فإنّ ذلك هو ما يدعوهُ العلماءُ **بالتجربةِ الذهنية thought experiment**، وهيَ تجربةٌ مُتَصَوَّرَةٌ وحَسْب، إذ لم يتمّ حُدوثها فعلاً، وفي الحقِّ، فإنّ الكثيرَ مِن التجاربِ الذهنيةِ **لا يُمكنُ** إجراؤُها فعلاً. والنظرُ إلىٰ المشتري مِن «آوْ» هو واحدٌ مِن تلكَ التجارب، إذ إنّ «آوْ» ليس مِضيافاً بما يكفي حتىٰ يُمكنَ أن نَحُطَّ عليه رِحالَنا ونُجرِيَ فيه هذهِ التجربة. ولكنَّ ذلكَ يجبُ أن لا يمنَعَنا مِن **تَصَوُّرِ** ما يُمكِنُ أن يبدُوَ عليه المشتري لو نظرْنا إليهِ مِن علىٰ سطحِ «آوْ»، ولَسَوْفَ يكونُ في إمكانِنا، مِن خلالِ الكلامِ علىٰ أعاجيبِ الكونِ السبعِ، أن تَسْنَحَ الفرصةُ لنا لِنُجريَ مَزيداً مِن هذهِ التجاربِ الذهنية.

وداعاً للأرض

وهكذا نودِّعُ أولىٰ العجائبِ السبع. وأما وقد وُلِدْنا وترعرعْنا علىٰ سطحِ هذه الأرضِ، فلقد صِرنا متعوّدينَ علىٰ رؤيةِ نماذجَ معيَّنَةٍ مِن الظواهرِ الطبيعيةِ. علىٰ أنّه لا بُدَّ



الشكل ١,١٩: صورةٌ التقطتْها المَرْكبةُ الرَّحالة ـ ٢ Voyager II، للمشتري، في ١٠ حزيران ١٩٧٩. ويمكنُ رؤيةُ القمرِ التابعِ له «آوْ» إلىٰ اليمين (صورةٌ مِن ناسا).

لنا أن نُدركَ بأنّ هذهِ الظواهرَ، رغْمَ تنوّعِها، وأثَرِها الباقي في النفس، وجَلالِها، فإنَّها محدودةٌ حتماً بحجمِ الأرض، وبيئتِها، وخصائِصِها الطبيعيةِ الأخرىٰ. إنّ العجائبَ التي وصَفْناها في هذا الفصلِ الافتتاحيِّ قد أرَتْنا لَمَحاتٍ خاطفةً عمّا يكمُنُ هناكَ، حالَما نكونُ قد تَرَكْنا يابِسَتَنا. ولا رَيْبَ في أنّ القرنَ الواحد والعشرين، ومع التقدُّم الحاصلِ في مساعي الإنسانِ في الفضاء، سوف يُضيفُ المزيدَ والمزيد إلىٰ هذه النَّظَراتِ الخاطفةِ. ولكنّنا سوف نَجِدُ، ونحنُ ننتقلُ إلىٰ بقيّةِ الأعاجيب، بأنها تَقَعُ بعيداً جدّاً عنّا، بحيثُ إنّه ليس بإمكانِنا أن ننظرَ إليها عن قُرْب. وبدلاً مِن ذلك، فإنَّ علينا أن نعتمدَ علىٰ المُراقَبةِ البعيدةِ مِن خِلالِ التقنياتِ الفلكية. ورغمَ أنَّ تلكَ الأحداثَ الكونيةَ تجري علىٰ أبعادٍ سحيقةٍ عنّا، إلاّ أنّنا لا يَسَعُنا إلاّ أن نُقَدِّرَ جلالَها وعظمتَها، وأن ننظرَ بِعَيْنِ الإكبارِ إلىٰ مُدَياتِها الهائلة.

الأعجوبةُ (٢)

العمالقةُ والأقزامُ
في عالَمِ النجوم

لقد تطرّقْنا، في الفصلِ الأوّل، إلىٰ أوّلِ إضمامَةٍ مِن أعاجيبِ الكون، حيثُ واجَهْنا مَواقِفَ غايةً في الغرابةِ، حالَما تَعَدَّيْنا تُخومَ الأرض. وكما قُلنا في نهايةِ ذلك الفصل، فإنَّ بقيةَ الأعاجيبِ تختصُّ بالأجزاءِ الأبعدِ والأبعدِ مِن الكون، أجزاءٍ هي أقصىٰ حتىٰ مِن أن نُفكِّرَ مُجَرَّدَ تفكيرٍ في زيارتِها في رِحلةٍ كونيّةٍ حقيقية، علىٰ مَتْنِ مركبةٍ فضائيةٍ تحمِلُ بَشَراً.

وحتّىٰ نُدرِكَ مدىٰ أهميةِ هذا الموضوع، فلْنَأخُذْ أوّلَ رِحلةٍ قامَ بها أيُّ مخلوقٍ بشريٍّ، علىٰ الإطلاقِ، إلىٰ مَوْطِنٍ آخَرَ يَقَعُ في المنظومةِ الشمسية. ولقد أنجزَ هذه 'العلامةَ الفضائيةَ الفارِقةَ' كلٌّ مِن نيل آرمسترونغ وأدوين أولدرين، في ٢٠ تموز مِن عام ١٩٦٩، عندما وضعا أقدامَهما علىٰ القمر. وكما وَصَفَها آرمسترونغ حينئذٍ، فلقد 'شَكَّلَتْ تلكَ الخطوةُ الصغيرةُ للإنسانِ قفزةً عظيمةً للبشرية'. وفي الحقِّ، فلقد كانت لحظةً تاريخيةً، عندما وضَعَ فردٌ ما مِن الأرض قدميه، ولأولِ مرّةٍ في التاريخِ، علىٰ سطحِ غيرِ سطحِ الأرض.

ولقد استغرَقَتْ رِحلةُ أبولّو (٢) Apollo II تلكَ، إلىٰ القمرِ، حوالىٰ ثلاثٍ وسبعينَ ساعةً في كُلٍّ مِن الاتجاهيْن. كم يَبْعُدُ القمرُ عن الأرض؟ يمكننا أن نُعطِيَ هذه المسافةَ بالكيلومتراتِ أو الأميال، ولكنْ فَلْنَسْتَخْدِمْ وحدةً أخرىٰ أكثرَ مُلاءَمَةً للمسافاتِ الفلكية. إنّ أسرعَ وساطةٍ متوفرةٍ في الطبيعةِ لانتقالِ الإشاراتِ هي الضوءُ. ويسير الضوءُ مسافةً تَقْرُبُ مِن ٣٠٠٠٠٠ كيلومترٍ في الثانيةِ الواحدة. وكذلكَ يُمكنُنا أن نُقَدِّرَ بُعْدَ جِرْمٍ فلكيٍّ

ما عنّا **بالزمنِ** الذي يستغرقُه الضوءُ الصادرُ منهُ للوصولِ إلينا. وهكذا فإنَّ مسافةَ **ثانيةٍ ضوئيةٍ واحدةٍ one light second** هي المسافةُ التي يقطعُها الضوءُ في **الثانيةِ الواحدة**. وتبلغُ هذه، كما قد رأيْنا، ٣٠٠٠٠٠ كيلومتر، وفي هذا المقياسِ، فإنّ القمرَ يبعُدُ عنّا نحواً مِن ثانيةٍ ضوئيةٍ ورُبعِ الثانية.

وهكذا فإنَّ لدينا هاهُنا مسألةً حسابيةً، مِمَّا يُمكنُ أن نجدَهُ في أيِّ كتابٍ مدرسيٍّ، وهذهِ هي المسألةُ:

إنَّ أقربَ نجم إلىٰ الأرضِ، بَعْدَ الشمسِ، هو قِنْطورس «پروكسيما سنتوري» Proxima Centauri[1] وهو يَبعُدُ عنَّا حوالىٰ $\frac{1}{4}$ ٤ سنةٍ ضوئية. ولكنْ، كم سوفَ تحتاجُ مَرْكَبَتُنا القمريةُ الفضائيةُ للوصولِ إلىٰ هذا النجم؟

ولتوضيحِ المسألةِ، فلْنُلاحِظْ بأنَّ مَرْكَبَةَ أپولّو قد استغرقَتْ ٧٣ ساعةً لقطعِ المسافةِ التي يقطعُها الضوءُ في ثانيةٍ ورُبْع. فلنفترضْ أنّ مركبةً فضائيةً، أكثرَ حَداثَةً مِن تلك التي أخذتْنا إلىٰ القمرِ، سوف تقطعُ تلكَ المسافةَ في ٥٠ ساعة. فكم سوف تستغرقُ تلك المركبةُ الفضائيةُ لقطعِ المسافةِ التي يقطعُها الضوءُ في أربع **سنينَ** ورُبْعٍ؟ إنَّ كُلَّ مَن لم يَنْسَ الطريقةَ التقليديةَ في النسبةِ والتناسبِ يُمكنُ أن يحلَّ هذه المسألةَ. ولَسَوْفَ يأتيكَ الجوابُ أشبهَ شيءٍ بالصدمة: إنَّهُ نحوٌ مِن **ستمائةِ ألفِ سنة**. ومِن الواضحِ أننا نحتاجُ إلىٰ تِقْنيَةٍ أفضلَ بكثيرٍ جدّاً مِمّا نمتلكُهُ اليومَ، حتَّىٰ يصيرَ في إمكانِنا التَّرْحالُ ما بينَ النجوم.

ورغمَ ذلكَ، وحتَّىٰ لو لم يكُنْ في إمكانِنا أن نَصِلَ إلىٰ هناك، فإنّ علمَ الفَلَكِ يسمحُ لنا بمشاهدةِ وتقديرِ تلكَ الأعاجيبِ الكونيةِ الموغِلَةِ في البُعْدِ عنا. ولَسَوْفَ نقومُ بإلقاءِ نظرةٍ خاطفةٍ، في هذا الفصلِ، علىٰ سماءِ الليلِ المُزدانةِ والمزدحمةِ بالنجوم، ثمَّ نرىٰ كيف قد أمْكَنَ للفلكيين، بمساعدةِ مَراقِبهم ونظرياتِهم العلميةِ، في أن ينجحوا بالكشفِ عن الطبيعةِ الفيزياويةِ للنجوم. ولَسَوْفَ تبهرُ الصورةُ التي قد تكشّفتْ لهم أنفاسَنا.

ولكنْ ما هي الوسائلُ التي تمكِّنُنا مِن دراسةِ تلكَ النجومِ، في أبعادِها السَّحيقةِ،

---

(١) إن «پروكسيما سنتوري» هي نجمٌ خافت صغير مرافق للنجم α Centauri، والأولى أقرب من الثاني بعُشْرِ السنة الضوئية، ولكنها ليست ساطعة بما يكفي حتى تمكن رؤيتها بالعين المجردة. ويعرف النجمُ α Centauri أيضاً باسم رجل قنطورس Rigil Kentaurus، والذي هو أقربُ نجم مرئي إلى الشمس، كما أنه أكبرُ في اختلاف المنظر «parallax» بين النجوم، إذ إنه يبلغ ٠,٧٥ فرسخاً نجمياً. د.س

وتفهُّمِها؟ سوف نشرحُ قصّةَ نجاحِ العِلمِ الحديثِ تلكَ، في خطواتٍ صغيرة. إنّها إحدىٰ أعاجيبِ رِحلتِنا الفضائية.

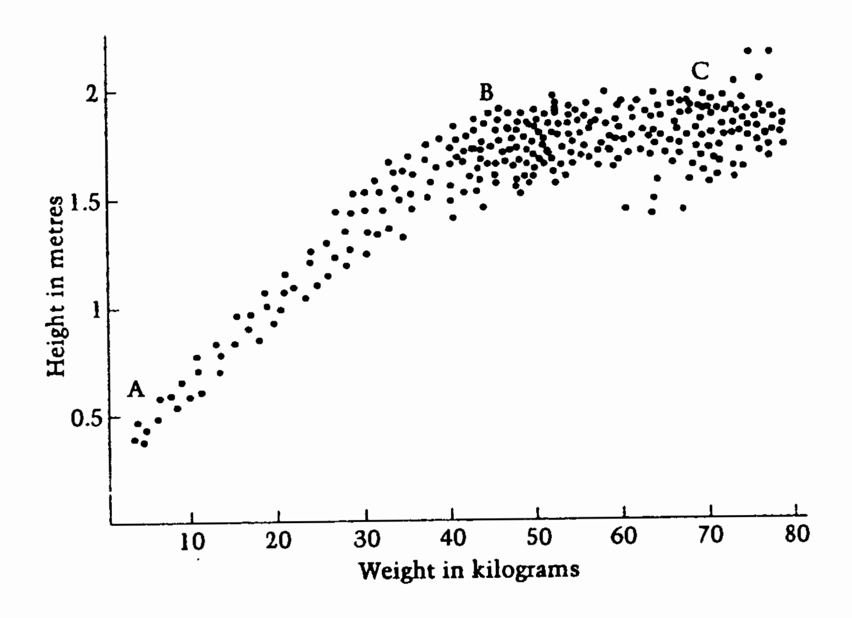
النجومُ والإنسان

فلنتخيّلْ السيناريو التالي: تقتربُ مَرْكبةٌ فضائيةٌ قادمةٌ مِن خارجِ الأرضِ، وهي تحملُ مخلوقينَ متطوّرينَ، وهؤلاءِ المخلوقونَ مِن خارجِ الأرض (extraterrestrials (= ETs هُم أكثرُ تطوّراً منّا نحنُ البشرُ بكثيرٍ، ولكنهم يَحْذَرونَ أن يَحُطّوا رِحالَ مركبتِهم علىٰ سطحِ الأرضِ، إذْ إنَّهم قبل أن يفعلوا ذلكَ يُريدونَ أن يعرفوا ما هُوَ أكثرُ عنّا، فهُم يريدون أنْ يعرفوا عن كيفيّةِ ولادةِ البشرِ، وكيفَ يكبرُونَ، وكيفَ يعيشونَ حياتَهم، ثُمَّ كيفَ هُم يموتون. وحتىٰ يتوصّلوا إلىٰ هذه التفاصيلِ، فإنهم يقومونَ بإنزالِ أحَدِهم إلىٰ الأرضِ، مُزَوَّداً بتعليماتٍ لاستكشافِ أكثرِ ما يمكنُ استكشافُه، وفي أقصرِ وقتٍ مُمكنٍ نسبياً، ولْنَقُلْ في أُسبوعٍ مِن أسابيعِ الأرض.

وما الذي سيفعلُهُ هؤلاءِ لاكتشافِ الحقائق؟ لا يَخفىٰ علينا أنَّ الطريقةَ الواضحةَ لعملِ ذلك، والتي تتبادرُ إلىٰ الذهن، بالابتداءِ مِن قسم التوليدِ في مستشفىً ما، لرؤيةِ طفلٍ يُولَدُ، ثم تَتَبُّع حياتِه طيلةَ عمرٍ يبلُغُ سبعةَ أو ثمانيةَ عُقودٍ، لَهِيَ طريقةٌ طويلةٌ جداً. ثمَّ إنَّ هذه المخلوقاتِ الآتيةَ مِن خارجِ الأرضِ لن تكونَ قد عَرَفَتْ، في نهايةِ المطافِ، كلَّ ما تريدُ معرفتَهُ عن عضوٍ واحدٍ فقط مِن الجنسِ البشريّ. ولمّا كُنّا نعرفُ الاختلافاتِ الموجودةَ حتّىٰ بين أفرادِ الجنسِ البشريِّ أنفسِهم، فإنَّ هذه الحالةَ المفردةَ التي سيدرسونَها قد تكونُ مضلِّلَةً تماماً.

وفي الحقِّ، فإنَّ السبيلَ العمليَّ المُتاحَ لهذه المخلوقاتِ من خارجِ الأرضِ تكمُنُ في الاعتمادِ علىٰ الاستقصاءِ والإحصاء. إنّ ذهابَ هذهِ المخلوقاتِ إلىٰ مدينةٍ كبيرةٍ واستكشافَ سُكّانِها مِن البشرِ سوف يُزوِّدُ هؤلاءِ بمعلوماتٍ عنِ الأنواعِ المختلفة. ولَسَوْفَ تكونُ هناكَ نماذجُ كثيرةٌ، مِن طِوالِ القامةِ وقِصارِها، وبجلودٍ مِن ألوانٍ وبَشراتٍ مختلفة، وألوانٍ للشَّعْرِ شَتَّىٰ، وبِأطوالٍ وسَمْكٍ للشَّعْرِ مُتباينة، وهَلُمَّ جَرّاً. وإذا ما قامت هذهِ المخلوقاتُ بجمعِ المعلومات عن نموذَجٍ كبيرٍ وكافٍ، فلسوفَ يكون في إمكانِها أن تستنتجَ شيئاً عن نشوءِ وتَبَدُّلِ الجنسِ البشريِّ مَع تَقَدُّمِ أعمارِهم.

وكَمِثالٍ علىٰ ذلكَ، يُرينا الشكلُ ٢,١ رسماً بيانياً لِأطوالِ مجموعةٍ كبيرةٍ مِن أمثالِ هؤلاءِ الناسِ مُقابلَ أوزانهم. ونلاحظُ هنا وجودَ ذيلٍ رقيقٍ في يسارِ الرسمِ البيانيّ، حيثُ



الشكل ٢,١ : يُرينا هذا الرسمُ البيانيُّ الوزنَ، في المِحْوَرِ الأفقيّ، والطّولَ، في المحورِ العموديّ، لِناسٍ يقطُنونَ في مدينةٍ نموذجية. ونرىٰ في الشكل ٢,٤ رسماً بيانياً مُشابِهاً لمجموعةٍ مِن النجوم. ويدلُّ المقطعُ AB علىٰ فترةِ النموِّ المبكّرِ، بينما يدلُّ BC علىٰ طورِ النجومِ البالغة.

الطولُ والوزنُ صغيرانِ، ثُمَّ إننا نجدُ، في الجزءِ قليلِ الانحدارِ مِن الرسم، اختلافاً كبيراً في الوزنِ مِن دونِ زيادةٍ محسوسةٍ في الطول. ويُمكننا أن نقولَ، مِن خلالِ فهمنا لنشوءِ البشر، إنَّ النهايةَ اليسرىٰ مِن الرسمِ تدلُّ علىٰ فترةِ النموِّ، مِن الطفولةِ وحتىٰ البلوغ، بينما يُشير الجزءُ قليلُ الانحدارِ مِن الرسمِ البيانيِّ إلىٰ فترةِ البلوغ. ويَدُلُّ وجودُ نقاطٍ أكثرَ في الجزءِ قليلِ الانحدارِ عمَّا هو عليهِ الحالُ في المنحنىٰ الصاعدِ، إلىٰ اليسارِ، علىٰ أنَّ المخلوقَ البشريَّ يقضي القِسمَ الأصغرَ مِن عمره في طورِ النموِّ إلىٰ البلوغ، مُقارَناً بطولِ حياةِ الإنسانِ باعتباره بالغاً. وإنَّ مُعْطَياتٍ إضافيةً، مِثْلَ نعومةِ الجلدِ، ونوعيّةِ الشَّعرِ، وغيرهما، سوفَ تزوِّدُ المخلوقاتِ الفضائيةَ بمعلوماتٍ أكثرَ عن شيخوخةِ الإنسان، بِشَرْطِ أن تكونَ تلكَ المخلوقاتُ قد أَتقنتْ عِلْمَ الأحياءِ المتقدِّم. وهكذا فَلَسَوْفَ يكونُ بوسْعِ هذهِ المخلوقاتِ الفضائية، بمساعدةِ هذهِ المُعْطياتِ، أن تُجَمِّعَ معاً أجزاءَ قصّةٍ عريضةٍ للحياةِ البشريةِ النموذجية، ولسوفَ تصيرُ لديهم أيضاً فكرةٌ ما عن مدىٰ اختلافِ بني البشرِ عن بعضِهم البعض. وهذا الأخيرُ هوَ أمرٌ مُمكِنٌ، لأنَّ البحثَ قد شَمَلَ أُنموذجاً كبيراً.

ويحملُ سيناريو اكتشافِ البَشَرِ هذا، في طيّاته، مُفتاحاً لحلِّ الألغازِ التي يُواجهُها علماءُ الفَلَك، فهُمْ يطمحونَ في الحصولِ علىٰ أجوبةٍ للأسئلةِ التالية: **كيف يعيشُ النجمُ حياتَه؟ وكيفَ يُولَدُ؟ وكيف يكتسبُ شكلَه، ولونَه، وحجمَه؟ وهل تتغيرُ خصائصُه تلكَ عندما يَشيخُ؟ ثمَّ هُناكَ السؤالُ الأهَمُّ مِن بينِ الأسئلةِ كلِّها، وهو: ما الذي يجعلُ النجمَ مُشْرِقاً؟**

وما الذي يمكنُ أن يفعلَهُ الفلكيون، حتىٰ يحصلوا علىٰ أجوبةٍ لهذه التساؤلاتِ؟

يملِكُ العلماءُ سبيلَيْنِ اثنينِ مُتاحَيْنِ لهما. ففي الشمسِ مِثالٌ لنجمٍ قريبٍ منهم جداً، وهي يمكنُ أن يَرصُدوها بأدَقِّ تفاصيلها. ولكنْ، أفَلَنْ يحصَلوا علىٰ جوابٍ لتساؤلِهم ذاكَ، إذا ما هُمْ ظلّوا مستمرّينَ علىٰ رَصْدِهم للشمسِ، طيلةَ الوقت؟

بلْ لا يكادون! إذْ إنَّ الشمسَ لا يَظهَرُ عليها أيُّ تغيُّرٍ خلالَ عمرِ الإنسان. لا ولا هيَ قد تغيَّرتْ بدرجةٍ محسوسةٍ طيلةَ عُمرِ الجنسِ البشريِّ كلِّه. وفي الحَقِّ، فإنَّ أعمارَهُم قصيرةٌ إلىٰ درجةٍ لا تُعَدُّ معها شيئاً مذكوراً مُقابلَ **نشوءِ** نجمٍ كالشمس. ثم، فلنفترضْ بأنَّ النجومَ، كالناسِ، ليست مُتشابهةً كلُّها، فهل إنّ بإمكانِنا، مِن بعد ذلكَ، أن نتوصّلَ إلىٰ معرفةِ كلِّ شيءٍ حولَها، مِن خلالِ مُراقبةِ الشمسِ، والشمسِ وحدَها؟ لَسَوْفَ نحتاجُ، مرّةً أخرىٰ، إلىٰ وسيلةٍ كتلكَ الوسيلةِ الثانيةِ التي اتّبعَتْها المخلوقاتُ الفضائيّةُ، والتي تقومُ علىٰ استقصاءِ شريحةٍ كبيرةٍ من الناسِ ثمَّ الخروجِ باستنتاجاتٍ إحصائيةٍ حولَها.

إنّ السماءَ المُزدانةَ بالنجومِ لَهِيَ تزخرُ فعلاً بالعددِ الكبيرِ منها. وفي الليلةِ الصافيةِ يمكنُنا أن نرىٰ منها، بالعينِ المجرّدة، نحواً مِن ألفَيْنِ اثنينِ مِن النجوم. وبالطبعِ، فهناكَ مِنها ما هُوَ أبعدُ مِن أن نراهُ بأعيُنِنا المجرَّدَةِ بكثير. وبمساعدَةِ المَراقِبِ، والتصويرِ الضوئيِّ، وتِقنيّاتِ الحاسوبِ الحديثةِ، يمكنُنا أن نجدَ مئاتِ الآلافِ منها. وتكشِفُ هذهِ الدراساتُ أنَّ النجومَ توجدُ في العادةِ، في مجاميعَ، أو عناقيد clusters. ويعني ذلكَ بأننا نَجدُ في الأحوالِ الاعتياديةِ، بدلاً مِن النجمِ المنعزِلِ، مجموعةً كبيرةً مِن النجومِ التي يدورُ أحدُها حولَ الآخر. وهناكَ أسبابٌ تدعونا للاعتقادِ بأن النجومَ الموجودةَ في العَنقودِ الواحدِ قد خُلِقَتْ مضمومةً معاً في مجموعةٍ، ولكنْ ليسَ مِنَ الضروريِّ أن تكونَ قد خُلِقَتْ كلُّها في الوقتِ ذاته.

كيف تُولَدُ النجوم؟

لَسَوْفَ نتطرّقُ إلىٰ هذا السؤالِ في الفصلِ القادمِ، ولكنّنا نُركِّزُ اهتمامَنا، الآنَ، علىٰ

النجومِ الموجودةِ في العُنقودِ الواحد، فنستعيدُ المَثَلَ الذي ضَرَبْناهُ في وجودِ الناسِ في المدينةِ الكبيرة.

ولدينا في الشكل ٢,١ رسمٌ بيانيٌّ لأوزانِ الناسِ مُقابلَ أطوالِهم، ولكنْ هل يمكنُ أن نفكِّر في رسم بيانيٍّ مُشابهٍ للنجوم؟ إنَّ هذا الرسمَ موجودٌ فعلاً، ولكنّه لا يتناولُ «أطوالَ» و«أوزانَ» النجوم، بل هو يتناولُ مَظهرَيْنِ آخَرَيْنِ للنجوم مِمَّا يُمكنُ للفلكيِّ أن يقيسَهُ، رُغْمَ بُعْدِ النجومِ الشاسعِ عَنّا. ولقد فَكَّرَ عالِمانِ اثنانِ، كُلٌّ منهما علىٰ حِدَة، بهذا الرسمِ البيانيِّ، وهما أجنار هيرتزپرانغ (١٨٧٣ ـ ١٩٧٦)، وهنري نوريس راسل (١٨٧٧ ـ ١٩٥٧)، (الشكلان ٢,٢ و٢,٣)، وهو ما صارَ يُعرَفُ الآن **بمُخَطَّطِ هيرتزپرانغ ـ راسل Hertzsprung - Russell diagram**، وهو يُشارُ إليه، وبشكلٍ أبسطَ بِمُخَطَّطِ هـ ـ ر H - R diagram.

ويُرينا الشكلُ ٢,٤ مُخَطَّطَ هـ ـ ر لِأقربِ النجومِ إلينا وأكثرِها توهجاً. ونَجِدُ علىٰ المحورِ الأفقيِّ منهُ درجةَ حرارةِ سطحِ النجم، وعلىٰ المحورِ العموديِّ إضاءتَه luminosity، أي معدّلَ إشعاعِ النجمِ للطاقةِ. كيف يتمكّنُ الفلكيُّ مِن تحديدِ هذه الكميّات؟ لسوفَ نشرحُ ذلكَ في الفَصلِ القادم، ولكننا سوف نُناقشُ أولاً المظاهرَ الرئيسيةَ لمخطَّطِ هـ ـ ر (الشكل ٢,٤).



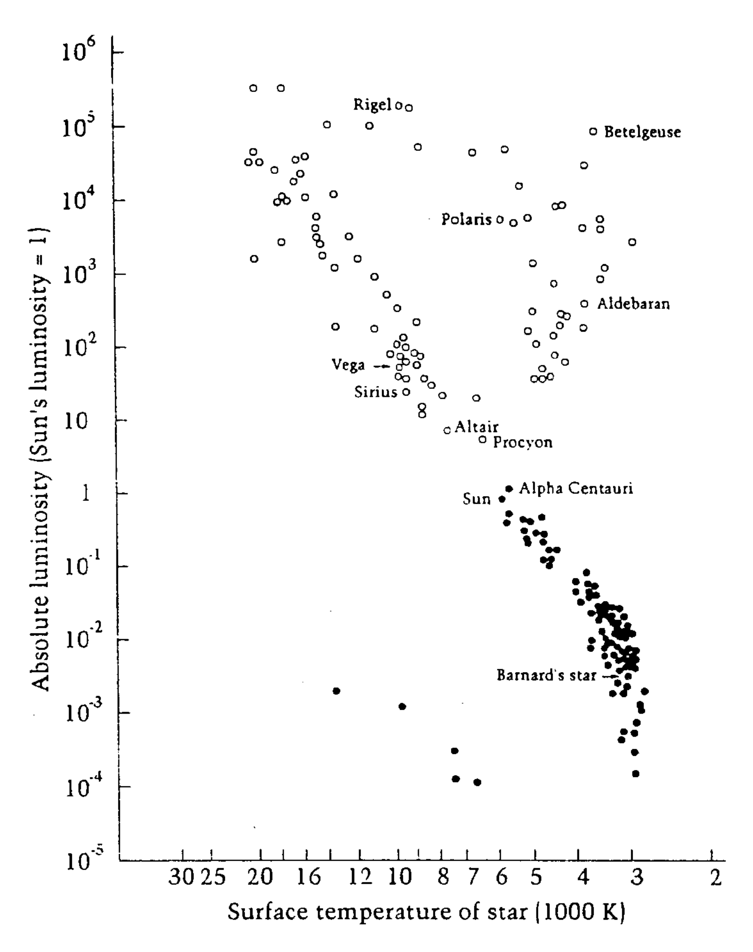
الشكل ٢,٢ : أجنار هيرتزپرانغ (صورةٌ مِن القسمِ الفلكيّ، في جامعةِ ييل).

ونُلاحظُ هنا أنّ عدداً كبيراً من النجوم، والشمسُ منها، تقعُ في شريطٍ عريضٍ يمتدُّ مِن الركنِ العلويِّ الأيسرِ إلىٰ الركنِ السفلِيِّ الأيمن، وبِقراءةِ المقياسِ الأفقيِّ نَجِدُ أنّ درجةَ حرارةِ السطحِ تهبطُ كلَّما اتجهْنا يميناً. وهكذا فإنَّ النجومَ التي تقعُ في الركنِ السفليِّ الأيمنِ باردَةٌ نسبياً، ولْنَقُلْ إنَّ درجةَ حرارتِها تبلغُ حوالىٰ ٤٠٠٠ درجةٍ مئوية، بينما قد تَصِلُ درجةُ حرارةِ النجومِ في الركنِ العلويِّ الأيسرِ إلىٰ ما هو أكثرُ مِن ٣ أضعافِ درجةِ حرارةِ الأولىٰ. إنَّ الشمسَ التي تبلغُ درجةُ الحرارةِ علىٰ سطحِها ما يقرُبُ مِن ٥٥٠٠ درجةٍ مئويةٍ تقعُ في الوسطِ مِن هذيْنِ المكانيْنِ مِن هذا الشريط.

ويُعْرَفُ هذا الشريطُ **بالتتابُعِ الرئيسيِّ main sequence**. ومِثلُ الشريطِ المستعرَضِ في المخطَّطِ البشريِّ، في الشكل ٢,١، فإنَّ التتابعَ الرئيسيَّ يُمثِّلُ مُعظَم حياةِ النجم. ولا تقعُ كلُّ النجوم بالطبعِ علىٰ هذا الشريط، فالقليلُ القليلُ منها ما هُوَ يقعُ أعلىٰ منهُ، في الركنِ العلويِّ الأيمن. وهي نجومٌ أبرَدُ مِن غيرِها، ولكنّها أكثرُ إضاءةً مِن غيرِها بكثير، وهي



الشكل ٢,٣: هنري نوريس راسل (الصورة مِن مرصد كيركيس).



الشكل ٢،٤: مُخَطَّطُ هـ - ر، للنجومِ الأقربِ والأكثرِ لمعاناً. ونَجِدُ الشمسَ وقليلاً مِن النجومِ المعروفةِ جيداً، مذكورةً بالاسم. وتُشيرُ الدوائرُ الممتلئةُ إلىٰ النجومِ الأقرب، وأمّا الدوائرُ الفارغةُ فهي تُشيرُ إلىٰ النجومِ الأكثرِ لمعاناً.

تُعرَفُ **بالنجومِ العملاقةِ giants**، لأَسبابٍ سوف نتبيّنُها في مكانِها المناسب. وبالمثلِ، فإنَّ النجومَ التي تقعُ تحت التتابُعِ الرئيسيّ، في الركنِ السفليِّ الأيسر، **تُعْرَفُ بالأقزام dwarfs**، وهذه نجومٌ شديدةُ الحرارة ولكنها، وفي الوقت ذاتِه، باهتةٌ جدّاً.

وسوف ننظرُ في المظاهرِ الفيزياويةِ لهذه النجوم، أولاً، مِن قَبْلِ أنْ نسألَ عن كيفيةِ اكتسابها. إنَّ فهمَنا للنجوم لَهُوَ يُمَثِّلُ، بالفعلِ، فتحاً مُبيناً للعِلم. ولقد أظهرَ هذا النجاحُ أنَّ قوانينَ العِلمِ التي ندرسُها علىٰ كوكبنا السَّيار الصغيرِ نسبيّاً والمتواضعِ تنطبقُ علىٰ أجرامٍ كبيرةٍ مثلَ النجومِ التي تقعُ علىٰ مسافةِ سِنينَ ضوئيةٍ عديدة.

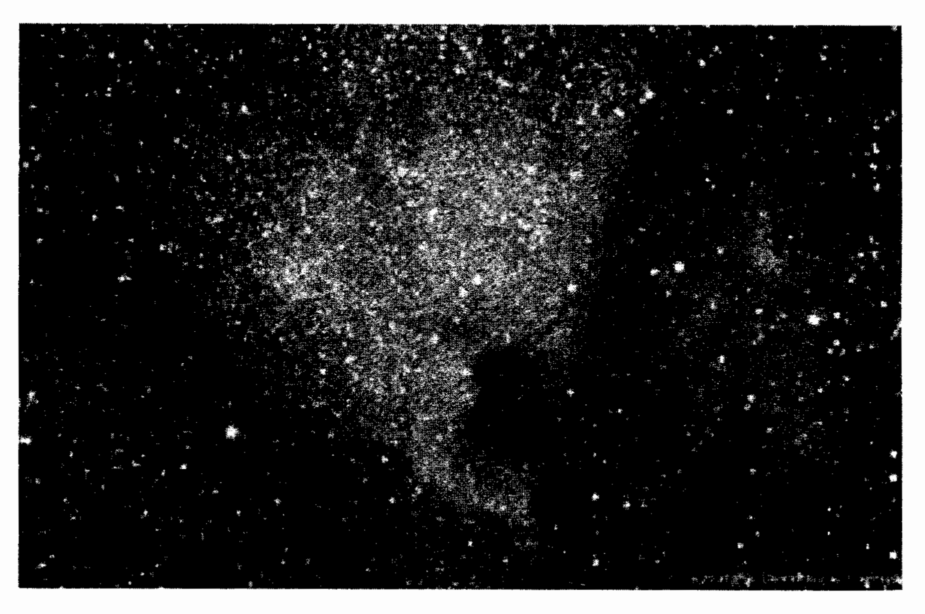
الصِّفاتُ الطبيعيّةُ للنجوم

لو تطلّعْنا إلىٰ السَّماءِ المُوَشّاةِ بالنجوم، فإنَّ أوّل انطباعٍ نخرُجُ به هو وجودُ نِقاطٍ مُتوهِّجةٍ مُتماثلةٍ مِن الضوءِ موزّعةٍ عَبْرَ السماءِ كلِّها. ولكنَّ نَظْرةً مُتفحِّصةً إليها تُبيِّنُ لنا **أنها ليست مُتماثلةً كلُّها**. فبعضُها ما هُوَ أسطعُ مِن غيره، ومنها ما هو أقلُّ سُطوعاً، وبعضُها أكبرُ مِن بعضٍ، ومنها ما يَميلُ لونُه إلىٰ الزُّرقةِ، بينما يميلُ لونُ بعضِها الآخرِ إلىٰ الحُمْرة. أمّا العالِمُ الفَلكيُّ، فهو يذهبُ إلىٰ أبعدَ مِمّا تراهُ العينُ المجرَّدةُ، إذ إنَّه يستخدمُ المِرْقاب telescope، مشفوعاً بأدواتٍ أخرىٰ. ويقومُ المِرقابُ بتجميعِ الضوءِ الساقطِ عليهِ بكميّاتٍ كبيرةٍ مِن المصدرِ، ثم هو يقومُ بتركيزهِ وتوجيههِ إلىٰ نقطةٍ مناسبةٍ، هُنالِكَ حيثُ تقومُ الآلةُ مَقامَ العينِ المجرَّدةِ. وهي يمكنُ لها أن تستخدمَ الضوءَ المركَّزَ لتكوينِ صورةٍ، أو أن تقومَ بتحليلِها إلىٰ طيفِها المكوَّنِ مِن ألوانٍ مختلفةٍ، أو هي تقومُ بقياسِ بعضٍ مِن خصائصِها الأخرىٰ. ولَسَوْفَ نرىٰ كيف تُساعدُ هذهِ الأدواتُ علىٰ مُعالجةِ المُعطَياتِ القادمةِ مِن النجوم.

إضاءاتُ النجوم Stellar luminosities

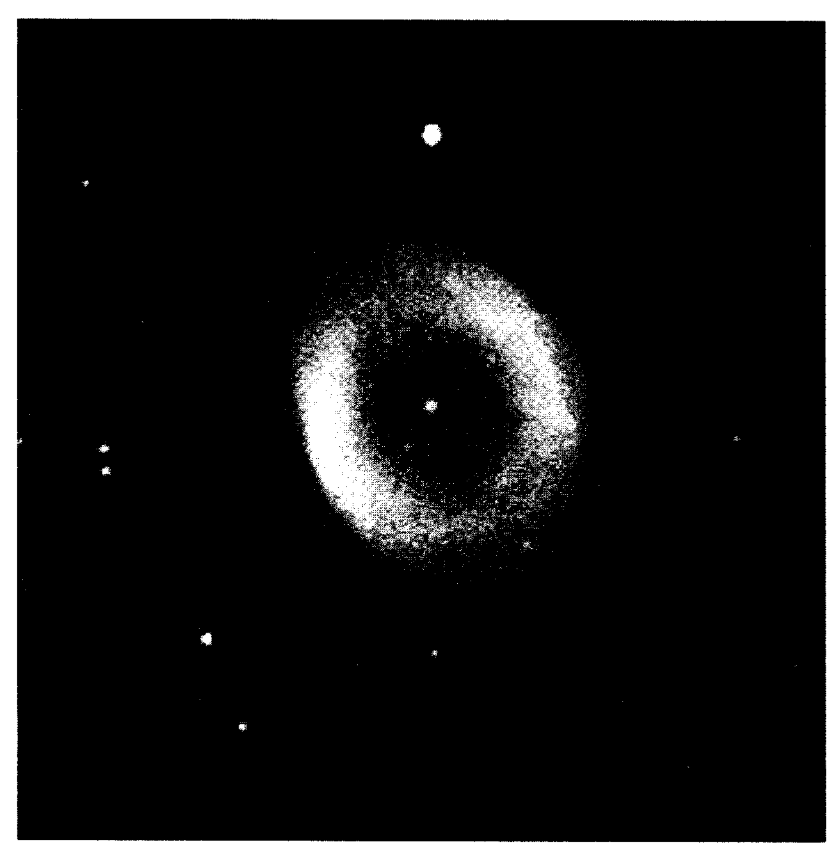
لقد أصبحَتْ آلةُ التصويرِ التي اختُرِعَتْ في القرنِ التاسع عَشَرَ الهديةَ المُهداةَ مِن السماءِ إلىٰ الفلكيِّ، إذ إنّها مَكّنَتْهُ مِن تصويرِ مَصادرِ الضوءِ الخافتةِ مِمّا لَم تُمْكِنْ رؤيتُه مِن قبلُ بالعينِ المجرَّدة قَطُّ. ويتمُّ تعريضُ اللوحِ الحسّاسِ (الفلم)، في آلةِ التصويرِ، إلىٰ المصدرِ الضوئيِّ البعيدِ لفترةٍ طويلةٍ مِن الوقتِ، لتجميعِ ما يَكفي مِن الضوءِ لتكوينِ صورة. وهكذا فإنَّ آلةَ التصويرِ تخدِمُنا باعتبارِها حليفاً مِثاليّاً للمِرقابِ، في الكشفِ عن الكونِ غيرِ المنظور. وليسَ النجومُ وحدَها، بل إنَّ الأجرامَ الكونيةَ الأخرىٰ الأبهتَ ضياءً صارت هدفاً لدراستِنا أيضاً.

ويُظهِر الشكلانِ ٢,٥ ـ ٢,٧ أمثلةً علىٰ بعضِ هذهِ الأجرامِ الباهتةِ في السماءِ، وتُعرَفُ هذهِ الأجرامُ عادةً باسم **السُّدُم، أو الغيوم السديمية nebulae**. ولقد اشتُقَّتْ كلمةُ nebulous، الإنكليزيةُ، والتي تدلُّ علىٰ الجسمِ أو الفكرةِ الغامضةِ أو المُضَبَّبَةِ، مِن اسم هذه الأجرام nebulae. ونلاحظُ هنا بأنَّ هذهِ السُّدُمَ، وعلىٰ عكسِ النجومِ التي تبدو كمصادرَ مُرَكَّزَةٍ للضوء، لا يبدو أنَّ لها حدوداً واضحةَ المعالم، وهو ما يُوحي بأنها قد تكونُ ممتدّةً إلىٰ أبعدَ مِمّا يمكنُ أن نتبيّنَه في تلكَ الصُّوَر. ومِن الواضح أنَّ فلماً أكثرَ سرعةً وفترةَ تَعَرُّضٍ للضوء أطولَ يُمكنُ أن يكشِفا عن المزيد.



الشكل ٢,٥ : سديمُ شِمالِيِّ أمريكا The North America Nebula (صورةٌ التُقِطَتْ من طريقِ جهازِ «CCD»، مِن قِبَلِ الفلكيَّيْنِ الهاوِيَيْنِ دومينيك ديرك وديرْك ديمارشي).

ولقد زوّدتْنا التِقنيةُ الحديثةُ بأداةٍ جديدةٍ لتصويرِ الأجرامِ الفلكيةِ الباهتة. وقد أحدثَتْ هـذه الأداةُ، وهـي تُـعـرَفُ بـاسـم CCD (charge coupled device)، أي **جـهـاز ازدواجِ الشِّحنةِ**، ثورةً في عالَمِ التصويرِ الفلكيّ. ويُبَيِّنُ هذا الجهازُ الذي نراهُ في الشكل ٢,٨، كيفيّةَ توزُّعِ الشِّدَةِ الضوئيةِ light intensity علىٰ أجزاءِ سطحِ التصوير المختلفةِ مِن سطحِ التصوير. وإنّ مِن المُناسبِ هنا استخدامَ فكرةِ الشِّدةِ الضوئيةِ مَقيسَةً بِرُزَم صغيرةٍ جداً تُعرَفُ بالفوتونات photons. ولقد أُخِذَتْ هذه الفكرةُ مِن **نظريةِ الكَمّات quantum theory**، التي تدرسُ سلوكَ المادةِ والإشعاعِ علىٰ المستوىٰ المجهريّ. ويُبدي الضوءُ، علىٰ هذا المستوىٰ، والذي قد عرفناهُ توّاً باعتبارِه موجةً، آثاراً تُظهِرُه وكأنّه يتكوَّنُ مِن جُسيمات. وهكذا فإنَّ الفوتوناتِ هي جُسيماتُ ضوءٍ، وهي عندما تسقطُ علىٰ سطحِ جهازِ ازدواجِ الشحنةِ «CCD» فإنها تُحرّرُ إلكتروناتٍ من السطحِ تقومُ حاسباتٌ خاصّة بتسجيلها. وهكذا تتحرَّرُ إلكتروناتٌ أكثرُ حيثُما سقَطَتْ فوتوناتٌ أكثرُ، ولِذا فإنَّ عَدَّ الإلكتروناتِ يُعطينا مُؤشِّراً علىٰ الأجزاءِ الباهتةِ والساطعةِ للصورة. ويقومُ حاسوبٌ مُتَّصِلٌ بالجهازِ بتتبُّعِ عددِ الإلكتروناتِ الخارجةِ مِن كلِّ جزءٍ من أجزاءِ سطحِ الجهازِ، ثمَّ هو يقومُ بتحويلِ حساباتِهِ إلىٰ صُوَرٍ اصطناعية. وتَستخدِمُ هذهِ الصُّوَرُ ألواناً مختلفةً للتمييزِ

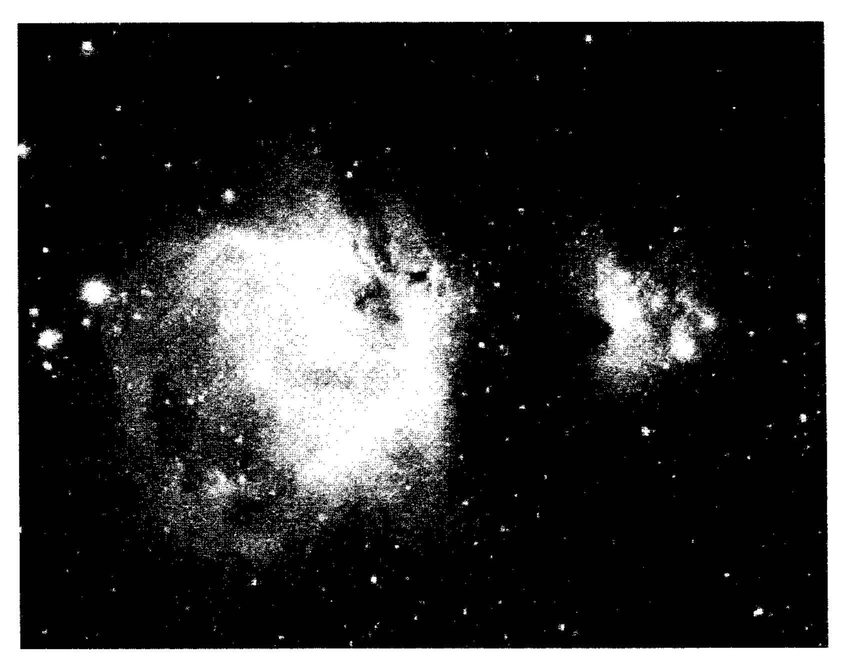


الشكل ٢,٦ : السَّديمُ الحَلَقِيّ The Ring Nebula (صورةٌ مأخوذةٌ بوساطةِ جهاز «CCD»، التقطَها نيلسون كالدويل).

بينَ المناطقِ ذاتِ الحساباتِ المختلفةِ، مِثْلَ خرائطِ المَناسيب contour maps في الأطالِسِ الجُغرافيّة.

والشَّكلُ ٢,٩ هو نسخةٌ بالأسْوَدِ والأبيضِ لِمِثْلِ هذه الصورة. واستخدامُ الحاسوب لَهُوَ كنزٌ لا ينضبُ للفلكيِّ الذي يقومُ بدراسةِ مِثْلِ هذه الصُّوَرِ، إذ يمكنُه أن يُركِّزَ الانتباهَ، مِن خلالِ تغييرِ مُستوياتِ الشِّدَةِ، على أجزاء مُعيَّنةٍ مِن الصورةِ، أو أن يُكَبِّرَها، أو يُديرَها، وهَلُمَّ جَرّا. وتُعرَفُ هذه العملياتُ باسمِ **مُعالَجةِ الصورة image processing**.

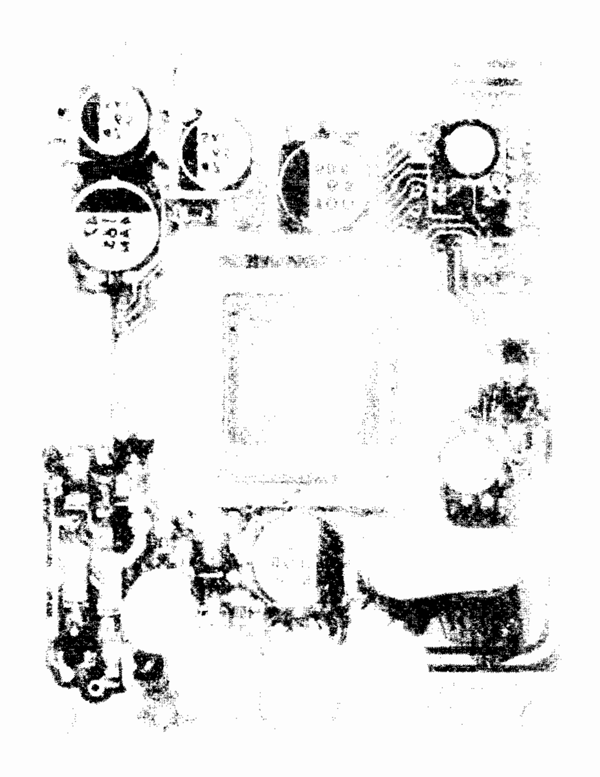
كما يُمكِنُ للفلكيِّ، مِن خلالِ تجميعِ الضوءِ القادمِ مِن نجم ما، أن يَقيسَ ما يُعرَفُ **بالسُّطوعِ الظاهريِّ apparent brightness**. ونقولُ ظاهِرِيّ، لأنَّ الصورةَ لا تحتوي على المعلوماتِ الكاملةِ عن **الإضاءةِ luminosity**، أي المُعَدَّلِ الفَعّالِ لإشعاعِ النجمِ للطاقة.



الشكل ٢,٧ : سديمُ أوريون Orion Nebula.

ونضربُ مَثَلاً يوضِّحُ ما نقول، بِبُصَيْلَةِ الجزءِ الزجاجيِّ مِن المصباح الكهربائيّ. ولنفرضْ أنّنا ننظرُ إلىٰ هذهِ البُصيلةِ الكهربائيةِ المضيئةِ بقوّةِ ١٠ واط، علىٰ مسافةِ ١٠ أمتار، ولسوفَ يتكوّنُ لدينا انطباعٌ مُعيَّنٌ عن مدىٰ إضاءةِ البُصيلة. وإذا ما ابتعدْنا عنها، فسيبدو ضوؤُها أبهتَ مِن ذي قبل، وأما إذا صِرنا علىٰ بُعْدِ ١٠٠ مترٍ عنها فلسوفَ تبدو أبهتَ بكثير. ولقد قُلنا إنّ السطوعَ الظاهريَّ لبُصيلةِ المصباحِ يقِلُّ كُلَّما زادَ بعدُه عنا، ولكنْ ما هو مُعدَّلُ حدوثِ هذا التناقُص؟ حتىٰ نَجِدَ الجوابَ، فَلْنُعِد التجربةَ ذاتَها ببصيلةٍ ذاتِ ١٠٠٠ واط. ورُغمَ أنها في ذاتِها أكثرُ سُطوعاً مِن البُصيلةِ ذاتِ ١٠ واط، فإنَّها سوف تصيرُ، هي أيضاً، أبهتَ وأبهتَ كلّما ابتعدْنا عنها. علىٰ أننا يُمكننا أن نتأكدَ، مِن خلالِ تجاربَ عديدةٍ، بأنّ سُطوعَها الظاهريَّ علىٰ بُعْدِ ١٠٠ مترٍ يُقارِبُ جدّاً السطوعَ الظاهريَّ لِبصيلةٍ ذاتِ ١٠ واط، ناظرينَ إليها علىٰ مسافةِ ١٠ أمتار.

وهذا يعني أننا، حتىٰ نُعَوِّضَ عن نقصٍ في السطوعِ الظاهريِّ ناتِجٍ عن زيادةٍ في المسافةِ تبلغُ **١٠ أضعافٍ**، فإننا نحتاجُ إلىٰ زيادةٍ في السطوعِ الحقيقيِّ لبُصيلةِ المصباحِ تبلغُ **مائةَ ضِعْفٍ**. ويمكنُ تعميمُ النتيجةِ علىٰ شكلِ قانونٍ يُعرَفُ، علىٰ نطاقٍ واسع، **بقانونِ التربيعِ العكسيِّ** للإضاءة **inverse square law of illunination**، وهو يَنُصُّ علىٰ أنَّ

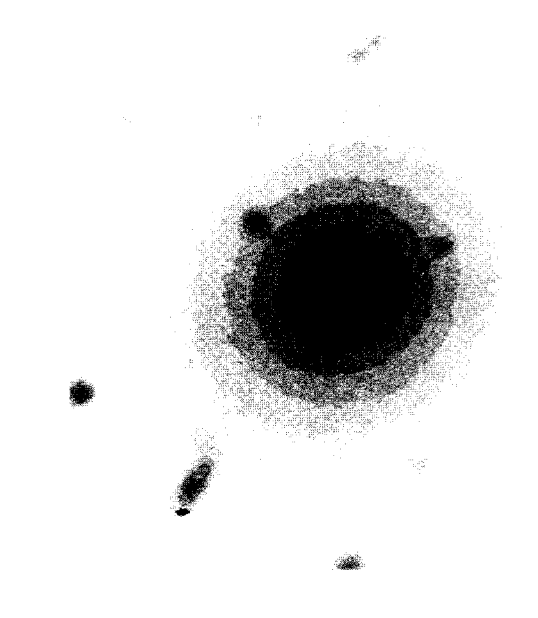


الشكل ٢,٨: جهازُ ازدواجِ الشِّحنةِ CCD، أو charge Coupled device، منصوباً علىٰ بطاقةٍ، مع الإلكترونات المصاحِبة.

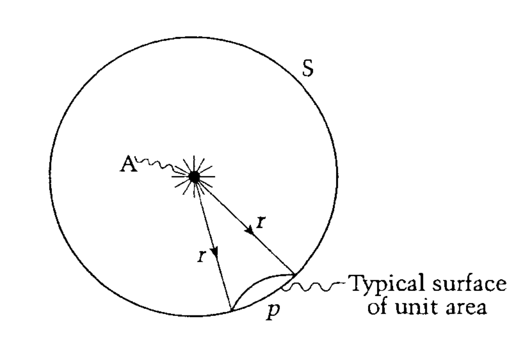
السُّطوعَ الظاهريَّ لمصدرِ ضوءٍ ما يتناقصُ بصورةٍ تتناسبُ عكسياً مع مُرَبَّعِ بُعدِه عن المُشاهد. وبعبارةٍ أخرىٰ، إذا كان لدينا مصدرانِ للضوءِ، وهما المصدرُ (أ)، وهو يبعُدُ (ع) مَرَّةً كبُعْدِ المصدرِ (ب)، فحتىٰ يبدوَ المصدرانِ في سطوعٍ واحدٍ بالنسبةِ إلىٰ المُشاهِد، يتوجّبُ أنْ يكونَ المصدرُ (أ) مُضيئاً ع ٢(= ع × ع) مرَّةً بقَدْرِ المصدرِ (ب).

وهناكَ طريقةٌ سهلةٌ لفهمِ قانونِ التربيعِ العكسيِّ لِلإضاءة. ففي الشكلِ ٢,١٠، يرسلُ المصدرُ الضوئيُّ A بإشعاعٍ متساوٍ في كلِّ الاتجاهاتِ، ويُعرَفُ هذا المصدرُ **بالمَصدرِ المُوَحَّدِ الخواص**[١] **isotropic source**. وباعتبارِ أنّ A هي المركزُ، نرسمُ الكرةَ S ونصفَ قُطرِها r. وحينئذٍ تكونُ مِساحةُ السطحِ الكرويِّ S هي $4\pi r^2$، حيث تُشير π إلىٰ النسبةِ الثابتةِ التي يتمُّ تقريبُها غالِباً بالكسرِ ٢٢/٧. وإذا ما أخذْنا بهذهِ القيمةِ التقريبيةِ للنسبةِ الثابتةِ لاستنتجْنا بأنّ كرةً يبلغُ نصفُ قُطرِها ٧ أمتارٍ سوفَ تساوي مِساحتُها السطحيةُ ٦١٦

(١) أي مُتساوي الخواصِّ في جميعِ الجهات. د.س



الشكل ٢,٩ : صورةٌ مولَّدةٌ بالحاسوبِ للمجرّة ٢٢٥ـ ٣٣٤، وقد التُقطَتْ في مرصدِ لاس كامپانَس، في تشيلي. إنَّ المحيطاتِ المختلفةَ (التي تفصِلُ بين مناطقَ مختلفةٍ مِن التدرّجاتِ اللونية) تمثِّلُ خطوطاً لشدّةٍ متساوية (عن أشيش ماهابال).



الشكل ٢,١٠ : إنّ النقطةَ التي هي مصدرُ الضوءِ A، تَشعُّ بصورةٍ متساويةٍ في كلِّ الاتجاهات. ونرىٰ هنا كرةً مركزُها A، والتي يَعْبُرُ الضوءُ، عَبْرَ سطحِها، مِن النقطة A، بصورةٍ منتظمة. إنَّ كل وِحدةٍ للمساحةِ علىٰ سطحِ الكرةِ تستلمُ الكميةَ ذاتَها مِن الضوء الذي يعبرُها إلىٰ الخارج.

مِتراً مربّعاً. ولكنْ فلنركِّزْ علىٰ الدائرةِ ذاتِ نصفِ القطرِ r، ولنتخيّلْ الراصدَ O واقفاً علىٰ هذهِ الكرة، فما هو مقدارُ الطاقةِ التي سوف تجيءُ، من النقطةِ A، في الثانيةِ الواحدة، لكلِّ وِحدةِ مِساحةٍ حولَ هذا الراصد؟ إنَّ هذا المقدارَ سوف يُحدِّدُ السُّطوعَ الظاهريَّ للمصدر. ولمَّا كانتِ النقاطُ المتوضِّعةُ علىٰ سطحِ الكرةِ تتساوىٰ في استلامِ الطاقةِ مِن النقطة A، والمساحةُ التي تشغلُها كلُّها تساوي $4 \pi r^2$، أي ٤× النسبة الثابتة × مربّعِ نصفِ القطر، فإنَّ كميةَ الإشعاع مِن النقطةِ A، والآتيةَ عَبْرَ وِحدةِ المسافةِ، تساوي

الإضاءةَ luminosity مقسومةً علىٰ $4 \pi r^2$. أمّا الحِصّة التي يستلمُها الراصدُ O، فإنَّها تنخفضُ بالتناسبِ مع مُربّعِ نصف القطر.

وما ينطبقُ علىٰ بُصيلةِ المصباحِ ينطبقُ علىٰ النجوم. فلو رَصَدْنا النجميْنِ A و B، ووجدْنا أنَّ A يبدو أبهتَ بكثيرٍ من B، فما الذي نستنتجُهُ عن بُعْدَيْهما؟ لو علمَنا أنَّ A و B هما نجمانِ مُتساويا الإضاءةِ، فيمكنُنا أن نقولَ حينَئذٍ إنَّ A أبعدُ مِن B. ولكنْ، لو لم نملكْ هذهِ المعلومةَ الإضافيةَ فإننا لا نستطيعُ بالطبعِ أنْ نجزِمَ بذلك. ويُمكنُ مَثَلاً، أن تكونَ النقطتانِ A و B علىٰ البُعدِ ذاتِه عنّا، ولكنْ A هي أقلُّ إضاءةً مِن B بكثير. ولكنْ قد تَبيَّنَ، في نهاية المطافِ، أنّ النجومَ التي يُمكنُ أن نراها بالعينِ المجرّدةِ ليست بالضرورةِ الأقربَ إلينا مِن بينِ النجوم. وعلىٰ العموم فإنّها النجومُ البعيدةُ والأكثرُ إضاءةً. وإنّ بعضاً مِن النجومِ القريبةِ إلينا حقّاً هي في ذاتها باهتةٌ جدّاً (أي أنّ إضاءتَها منخفضةٌ جدّاً) إلىٰ الدرجةِ التي لا نتمكّنُ فيها مِن رؤيتِها دونَ معاونةِ المِرْقاب.

ويتمكّنُ الفلكيُّ، في الأحوالِ الاعتيادية، وبمساعدةِ المَراقِبِ وكاشفاتِ الضوءِ، كجهازِ ازدواجِ الشِّحنةِ «CCD»، أن يقيسَ السُّطوعَ الظاهريَّ للمصدر. وإذا ما أمكنَ أيضاً قياسُ بُعْدِ المصدرِ الضوئيِّ عنّا، فسيكونُ في إمكان الفلكيِّ، حينئذٍ، أن يُقَدِّرَ إضاءةَ المصدر. ويتمُّ ذلك بمُجَرَّدِ قَلْبِ النتيجةِ التي حصلْنا عليها للتَّوِّ، وذلك بضرْبِ الإضاءةِ الظاهريةِ المرصودةِ لِوحدةِ المساحة، بالرقم $4 \pi r^2$، حيثُ إنّ r يمثِّلُ بُعْدَ المصدرِ عنا.

فلنُطبِّقْ هذه الطريقةَ لتقديرِ إضاءةِ الشمس. تبعدُ الشمسُ عن الأرضِ حوالىٰ ١٥٠ مليونَ كيلومترٍ. وتبلغُ كميّةُ الطاقةِ الضوئيةِ الشمسيةِ الساقطةِ علىٰ كيلومِترٍ مربّعٍ واحدٍ مِن مِساحةِ الأرضِ، في كلِّ ثانيةٍ، نحواً مِن ١٥٠٠ ميغا واط[١]. ويعني ذلكَ أننّا لو تَمَكَّنّا مِن تحويلِ الطاقةِ الشمسيةِ الساقطةِ علىٰ مساحةِ كيلومترٍ مُرَبّعٍ واحدٍ لأَمكنَ لنا أن نستخدمَها لتشغيلِ محطَّةٍ لتوليدِ القوةِ الكهربائيةِ تبلغُ طاقتُها ١٥٠٠ ميغا واط. وهكذا، وباستخدام طريقةِ الحسابِ أعلاهُ، يمكنُ لنا أن نُقدِّرَ إضاءةَ الشمسِ بحوالىٰ ٤٠٠ مَليونِ مَليونِ مَليونِ ميغا واط! وهو رقمٌ ضخمٌ حقّاً بالمقاييسِ الأرضية! ولكنْ ليس بالمقاييس الفلكيةِ، وكما سوف نرىٰ بعدَ قليل.

وإذا نَحنُ أنعمْنا النظرَ في مخطَّطِ هـ .ر، لوجدْنا بأنّ الشمسَ تقعُ في منتصَفِ المسافةِ مِن مِحْورِ الإضاءة. وهناك نجومٌ، في هذا المخطَّطِ، هي أكثرُ إضاءةً مِن الشمسِ

---

(١) ميغاواط: ميغا ـ = مليون. الواط = وِحدة القوّةِ الكهربائية. د.س

بمائة مرّة. وتوجدُ مثلُ هذه النجومِ في التتابُعِ الرئيسيِّ، كما أنّها توجدُ علىٰ شكلِ نجومٍ عملاقة giants.

طيف النجوم

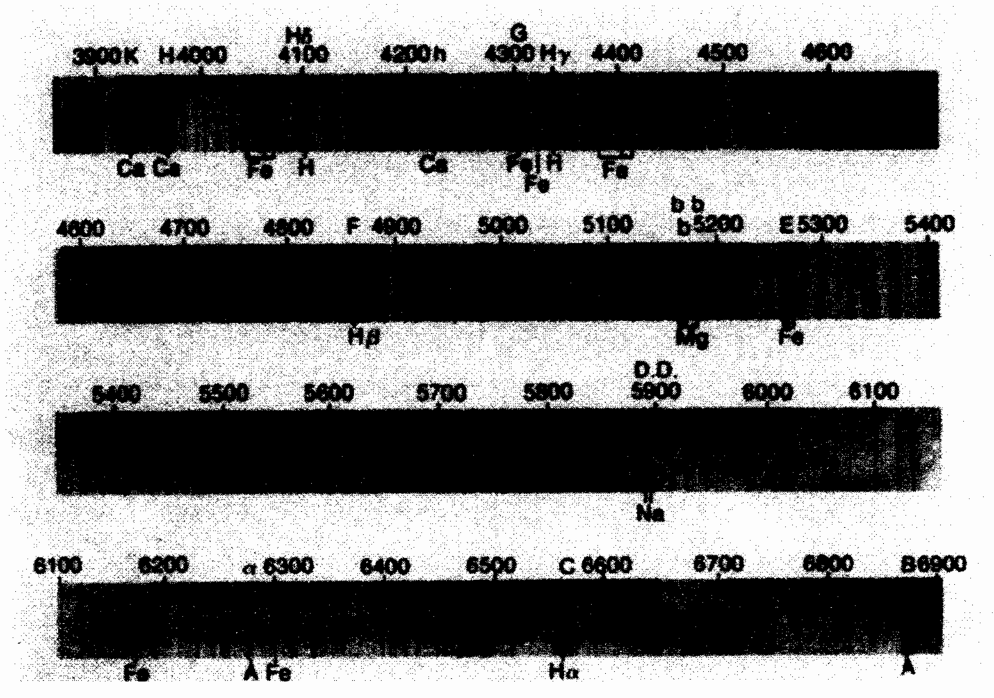
إنَّ الضوءَ القادمَ مِن النجم، وكما قُلْنا سابقاً، يُمكِنُ أن نفصلَهُ إلىٰ ألوانِ قوسِ قُزَحِ السبعةِ، ومثلَما يمكنُنا أن نفصِلَ مكوّناتِ ضوءِ الشمسِ، بالضبط، مِن خلالِ تمريرِهِ عَبْرَ الموشورِ، أو مِنْ خلالِ أداةٍ أكثرَ تعقيداً كالمِطياف (مِرْسَمَةِ الطيف) spectrograph. إنّ الألوانَ المختلفةَ تتوافقُ معَ موجاتٍ ضوئيةٍ ذواتِ أطوالٍ موجيةٍ مختلفة. ويمكنُ قياسُ الأطوالِ الموجيَّةِ هذهِ بوساطةِ المِطياف.

ولْننظرْ إلىٰ طيفِ ضوءِ الشمسِ، كما يظهرُ لنا في المطيافِ (الشكل ٢,١١). فبالإضافة إلىٰ السلسلةِ المتّصلةِ مِن الضوءِ، والتي تتراوحُ في لونِها ما بين البنفسجيِّ في الموجاتِ الأقصرِ طولاً، والأحمرِ في الموجاتِ الأطولِ، فإننا نُلاحظُ سلسلةً مِن خطوطٍ داكنة. فما هو منشأُ هذهِ الخطوط؟

لقد اكتشفَ جوزيف ڤون فراونهوفر هذهِ الخطوط، مِنْ قبلُ، عامَ ١٨١٤، فأُسمِيَتْ باسمه. ولقد ظلّتْ خطوطُ فراونهوفر لُغْزاً لم يُحَلّ لِأَكثرِ مِن قرنٍ مِن الزمان. ولم يتمَّ التوصّلُ إلىٰ حلِّ هذا اللغزِ إلاّ بعدَ حدوثِ ثورةٍ عُظمىٰ في البِنيةِ النظريةِ للفيزياء، مِن خلالِ اكتشافِ نظريةِ الكَمّات quantum theory. فلنحاولْ أن نفهمَ الآنَ أصلَ هذهِ الخطوطِ بلُغَةِ نظريةِ الكَمّاتِ هذه.

تسعىٰ نظريةُ الكَمّاتِ إلىٰ وصفِ سلوكِ البِنيةِ المجهريةِ للمادةِ، علىٰ المستوىٰ الذريّ. وتملكُ الذرّةُ النموذجيةُ حجماً يقرُبُ مِن عُشْرِ النانومترِ الواحد. وما إن حلَّ القرنُ العشرونَ حتىٰ صارَ الفيزوياويونَ يكتشفونَ أنَّ قوانينَ نيوتن للحركة، والتي أبْلَتْ البلاءَ الحَسَنَ في وصفِ الأنظمةِ الأرضيةِ، لا بَلْ والفلكيّةِ أيضاً، قد تبيَّنَ أنها لا تعملُ جيداً في مِثلِ هذه الأنظمةِ بالغةِ الضَّآلة. فلنأخذْ مِثالاً علىٰ أبسطِ ذرّةٍ نعرفُها، وهي ذرّةُ الهايدروجين.

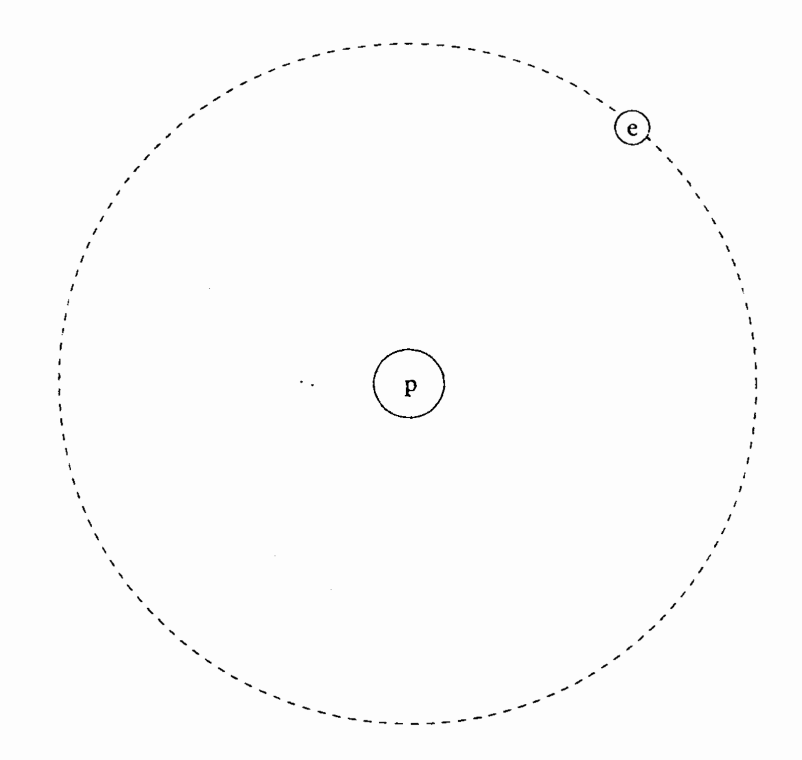
ويُرينا الشكلُ ٢,١٣ مخطّطاً للصورةِ شبهِ التقليديةِ لذرّةِ الهايدروجين، بالاستنادِ جُزئياً إلىٰ قوانينِ نيوتن. إنّ ذرّةَ الهايدروجينِ تملكُ جُسيميْنِ اثنيْنِ مِن المادة وحَسْب، وهما الإلكترونُ والبروتون، وكِلاهُما يحملُ شِحنةً كهربائية. والشِّحنةُ علىٰ البروتونِ موجبةٌ، وأمّا تلكَ التي علىٰ الإلكترون فهي سالبة، ولكنَّ الشحنتيْنِ متساويتانِ في



الشكل ٢,١١: الطَّيفُ المستمرُّ للشمسِ تَعبُرُه خطوطٌ قاتمةٌ كان جي فراونهوفر أوّلَ مكتشفٍ لها. والوِحداتُ هي بالأنغستروم (A^o) Angstrom، ١٠ A^o= ١نانومتر = ١٠$^{-٩}$ مِتر.



الشكل ٢,١٢: جي فراونهوفر
J. Fraunhofer.



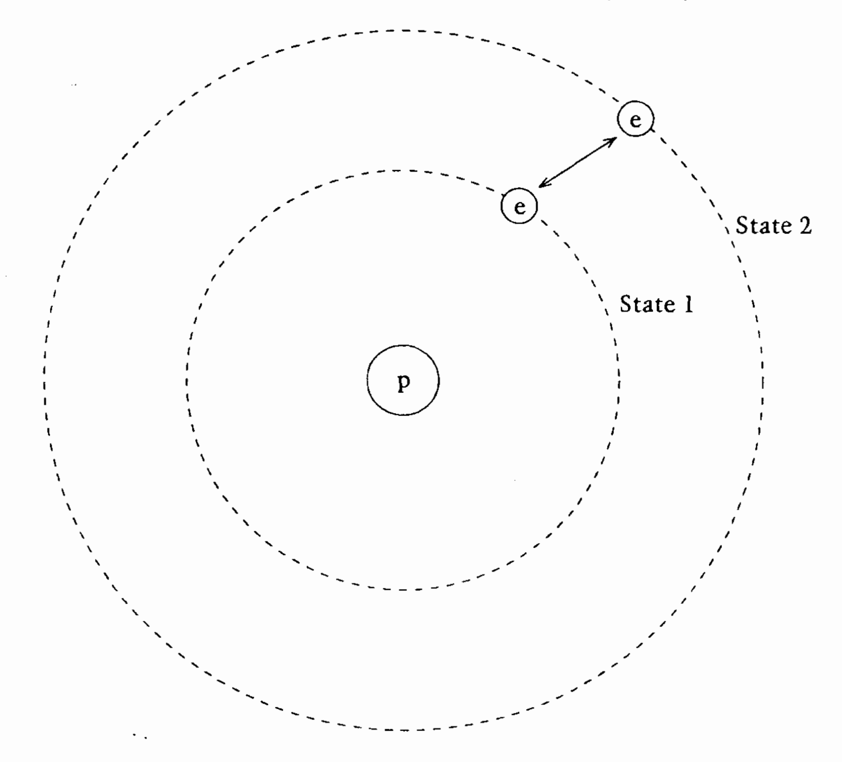
الشكل ٢,١٣: إنّ الصورةَ التقليديةَ لذرّةِ الهايدروجين، والتي تحتوي على إلكترونٍ واحدٍ يدورُ حولَ البروتون، هي أشبهُ شيءٍ بدورانِ الكوكبِ السّيارِ حولَ الشمس. ولو قد تمَّ تجهيزُ الإلكترونِ بمزيدٍ مِن الطاقةِ فلسوفَ يتحركُ مَدارهُ إلى الخارج بطريقةٍ مستمرة، هذا إذا سادتِ القواعدُ التقليدية.

المقدار. إلاّ أنّ البروتونَ أكبرُ كُتلةً مِن الإلكترون، حيثُ تبلغُ كتلتُه حوالى ١٨٣٦ مرّةً بِقَدْرِ كتلةِ الإلكترون. والإلكترون لا يكونُ في حالةِ سُكونٍ أبداً، إذ إنّه يستمرُّ في دورانِه حول البروتونِ الذي يَظَلُّ، وبسبب كتلتهِ الأكبرِ، ثابتاً، بينما يدورُ الإلكترونُ حولَهُ. ثم إنَّ علمَ الكهرباءِ الحَرَكيةِ electrodynamics التقليديةِ يُنبئُنا بأنّ مِثْلَ هذا الإلكترونِ الدائرِ في مدارهِ سوف يفقدُ مِن طاقتهِ مِن خلالِ إطلاقهِ للإشعاع. وبينما يقومُ الإلكترونُ بذلكَ فإنهُ يدنو مقترِباً من البروتونِ أكثرَ وأكثر، وتستغرقُ هذهِ العملية برُمَّتِها زمناً يَقرُبُ مِن جزءٍ مِن مَليونِ مَليونِ مَليونِ جزءٍ مِن الثانيةِ الواحدة. فكيفَ يُمكنُ، إذاً، لِذرّةِ الهايدروجين أن تحتفظَ بحجمِها المحدود؟

لقد كانَ نيلز بور، العالِمُ الفيزياويُّ الدانماركيُّ، هو الذي قَدَّمَ، في عام ١٩١٣، حلاً لتلكَ المُعضلة. إنّ الإلكترونَ عندما يفقِدُ مِن طاقتِهِ، في الحالةِ التقليدية، ينكمشُ

مَدارُهُ باستمرار، حتىٰ يصِلَ في نهايةِ المَطافِ إلىٰ حجم الصفر. أمّا في حَلِّ بور، فلقد تدخَّلَتْ قواعدُ جديدةٌ لنظريةِ الكمّاتِ لِتُبيِّنَ بأنَّ الإلكترونَ يمكنُ أن يدورَ، مِن دونِ إشعاعٍ للطاقة، ولكنَّ أحجامَ هذه المداراتِ تُكَوِّنُ طَقْماً منعزلاً.

ويُبيِّنُ الشكلُ ٢,١٤ وضعَ الكَمِّ، بصورةٍ تخطيطية، وهو يُظهرُ مَدارَيْنِ مَسموحٍ بهما ويمكنُ للإلكترون أن يدورَ فيهما. وهي مَداراتٌ متتاليةٌ في طَقْمٍ منعزل، ولِلْمدارِ الخارجيِّ فيها طاقةٌ أعلىٰ مِمّا هي عليه في المدار الداخليّ. افرضْ أن الإلكترون يقعُ، في الوقتِ الحاضرِ، في المدارِ الداخليّ، فلتمكينهِ مِن الحركةِ إلىٰ المدارِ الخارجيِّ لا بُدَّ أن نُزوِّدهُ بطاقةٍ إضافيةٍ تُساوي فَرْقَ الطاقةِ ما بينَ المَداريْن. **إنَّ الإلكترون، سوف لن يقفزَ إلىٰ المدارِ الثاني ما لَم يستلمْ هذهِ الكميةَ مِن الطاقةِ بالضبط، لا أكثرَ ولا أقلّ منها.**



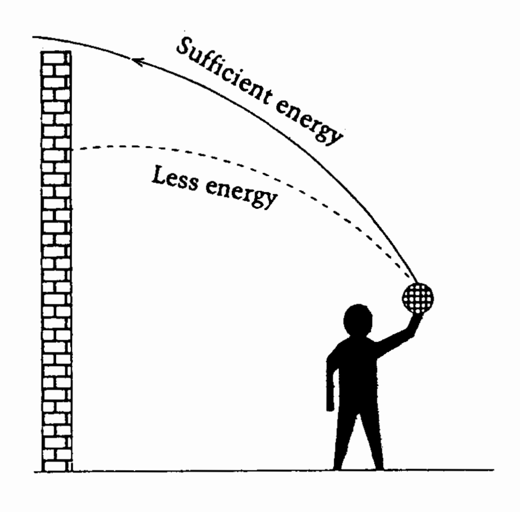
الشكل ٢,١٤: نَجِدُ في الشكلِ شِبْهِ التقليدي (المؤيِّدِ لفكرةِ الكَمّاتِ الكاملة) أنَّ الإلكترونَ في ذرّةِ الهايدروجين يتحرّكُ في واحدةٍ مِن مجموعةٍ محدَّدَةٍ مِن الحالاتِ، وبطاقاتٍ مختلفة. وتظهرُ هنا حالتانِ مِن هذا القبيل. ويمكنُ للإلكتروناتِ أن تقفزَ مِن حالةٍ إلىٰ أخرىٰ مِن خلالِ إصدارٍ أو امتصاصِ الطاقةِ الإشعاعية. وفي الشكل، فإنَّ الطاقةَ في الحالة ٢ أعلىٰ مِمّا هي عليهِ في الحالةِ ١. ولذا فإنَّ الإلكترونَ، في الحالة ١، سيحتاجُ إلىٰ طاقةٍ مِن مصدرٍ خارجيٍّ حتىٰ يصيرَ في إمكانهِ أن يقفزَ إلىٰ الحالة ٢.

وقد تكونُ هذهِ الطاقةُ، في واقعِ الحالِ، متوفرةً للإلكترونِ مِن الإشعاعِ الكهرومغناطيسيّ. وتُنبئُنا نظريةُ الكمّاتِ، هنا، بأنّ الإشعاعَ ذا الترددِ المُحدَّدِ يجيءُ في رُزماتٍ packets، تُعْرَفُ **بالكمّاتِ quanta**. إنَّ القاعدةَ التي جاءَ بها، أوّلَ الأمرِ، الفيزياويُّ الألمانيُّ ماكس پلانك، لَهِيَ بسيطةٌ جدّاً. اضْرِبْ ترددَ الإشعاعِ الكهرومغناطيسيِّ في الثابتِ الفيزياويِّ h، ولسوف تحصلُ علىٰ كَمٍّ مِن الطاقة the quantum of energy. والثابتُ h هو ثابتٌ عامّ، وهو يُعرَفُ **بثابتِ پلانك Planck's constant**، وهو يلعبُ دوراً أساسياً في كُلِّ الظواهرِ التي وصفَتْها نظريةُ الكَمّات. ولقد قامَ آينشتاينُ، بعدَ ذلك، بإدخالِ فكرةِ **الفوتون photon**، أو الجُسيمةِ الضوئية، والذي هو كَمُّ الإشعاعِ ذاتُهُ الذي استخدَمَهُ پلانك. وحتىٰ نتعرّفَ علىٰ كميةِ الطاقةِ التي يحملُها الفوتونُ، فقد يفيدُنا المِثالُ التالي: إنّ فوتوناتِ موجةٍ راديويةٍ بِطولِ موجةٍ مِن مِترٍ واحدٍ تحملُ طاقةً تبلغُ نحواً مِن ٢× ١٠^-٢٥ جول (خُمسِ الجزءِ الواحدِ مِن مَليونِ مليونِ مليون مليونِ جول!). أمّا في الضوءِ الأحمرِ الذي يبلغُ طولُ موجتهِ ٧٠٠ نانومترٍ، فإنَّ كلَّ فوتونٍ يحملُ طاقةً تبلغُ ٢,٨× ١٠^-١٩ جول. وحتىٰ فوتونُ أشعةِ غاما، ذاتِ الترددِ العالي جداً فإنّه يَحملُ كميّةً ضئيلةً مِن الطاقةِ بالنسبة إلىٰ معاييرنا اليوميةِ المعتادة. ولقد جاءَ اصطلاحُ نظريةِ الكَمِّ quantum theory، في واقعِ الحال، لتأكيدِ هذا الكَمِّ الضئيلِ مِن الطاقةِ الذي تحملُهُ رُزمة packet الإشعاعِ الكهرومغناطيسيّ.

استطرادٌ

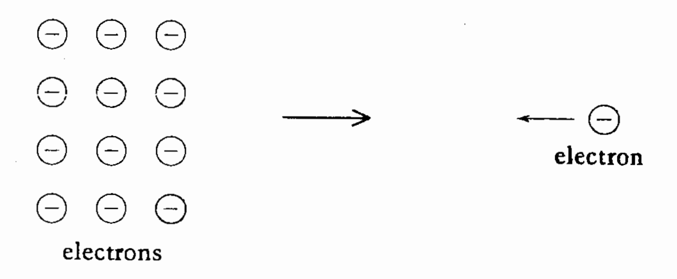
لسوفَ يشعرُ القارئ، في هذهِ المرحلةِ، عن حقٍّ، بالحَيْرَة. أَفَلَيْسَ الإشعاعُ الكهرومغناطيسيُّ يتألفُ من موجاتٍ، وكما ذكَرْنا في الفصلِ الأول؟ فكيفَ نحنُ نصِفُهُ أيضاً بأنّه مجموعةٌ مِن جُسَيماتٍ تُعْرَفُ بالفوتونات؟ كيف يمكنُ أن يكونَ الإشعاعُ الكهرومغناطيسيُّ مُكَوَّناً مِن موجاتٍ وجُسيماتٍ في الوقتِ ذاته؟

وفي الحقِّ، فإنّ مثلَ هذهِ التفسيراتِ الثنائيةِ التي تُناقِضُ نفسَها بنفسِها، كثيراً ما طَفَت علىٰ السطحِ، في المراحلِ المبكّرةِ لنظريةِ الكمّ، لأنَّ النظرياتِ الميكانيكيةَ للكمِّ غالباً ما تكونُ، وإلىٰ حدٍّ بعيد، ضدَّ البَداهة. وهذا الأمرُ لَهُوَ بالضرورةِ كذلك، لأنَّ بديهتَنا محكومةٌ بالعالَم العياني، أي المنظورِ macroscopic (وعكسُه المُجْهِريّ microscopic)، والذي يعملُ حسبَ قوانينِ الحركةِ النيوتنية. فلننظرْ في إحدىٰ هذهِ الأفكارِ البديهية.



الشكل ٢,١٥: يتوجّبُ علىٰ رامي الكرةِ أن يقذفَها بطاقةٍ كافية، إذا أرادها أن تعبرَ إلىٰ جهةِ الجدارِ المقابِلة.

نرىٰ، في الشكل ٢,١٥، رامياً لكرةٍ يواجهُ جداراً عالياً. هل يمكنُهُ أن يرميَ بالكرةِ إلىٰ الجهةِ الأخرىٰ؟ والجوابُ هو «نعم، ولكنْ بشرطِ أن يمتلكَ مِنَ الطاقةِ ما يكفي لرفعِ الكرةِ حتىٰ تعلُوَ الجدار». ولو كانَ الجدارُ أعلىٰ مِن أن يتغلَّبَ عليهِ الرامي، فإنّ الكرةَ لن تصلَ إلىٰ الجهةِ الأخرىٰ أبداً، إذ إنها سوف ترتدُّ عن الجدارِ. وهذا ما يُخبرُنا به علمُ الميكانيكِ التقليديّ لنيوتن. أمّا في العالَمِ المجهري أو العالمِ بالِـغِ الصِّغَرِ، وفي مسألةٍ مُشابهةٍ، فكيف سيكونُ سلوكُ إلكترونٍ يواجِهُ حاجزاً مُشابهاً؟ ويمكنُ إنشاءُ مثلُ هذا الحاجزِ في طريقِ الإلكترونِ، مثلاً، بوساطةِ إلكتروناتٍ أخرىٰ قريبةٍ. ولَسَوْفَ تُوَلِّدُ مثلُ هذهِ المجموعةِ مِن الإلكتروناتِ حقلاً كهربائياً يطرُدُ إلكتروناتِنا القادمةَ مثلما ترتَدُّ الكرةُ بعيداً عن الجدار. ويُرينا الشكلُ ٢,١٦ حاجزاً مِن هذا القبيل. ولو نظرْنا إلىٰ الحاجزِ



الشكل ٢,١٦: إنَّ السَّهمَ المتَّجِهَ إلىٰ اليمينِ يُشيرُ إلىٰ القوةِ التي تدفعُ إلىٰ الخلفِ الإلكترونَ المتّجهَ إلىٰ اليسار. وهكذا فإنَّ القوّةَ تنصبُ حاجزاً مانعاً للإلكترون. ولكنْ، هل يمكنُ للإلكترونِ عبورُ هذا الحاجزِ حتىٰ لو لم تكُنْ لديهِ الطاقةُ الكافيةُ لعملِ ذلكَ حسبَ قوانينِ نيوتن للحركة؟

باعتبارِه جبلاً يتوجّبُ تسلّقُهُ، فقد يكونُ هناكَ إغراءٌ لنا بالمُجادَلةِ، استناداً إلىٰ التشابهِ الجزئيِّ التقليديّ، بأنّ الإلكترونَ لا يَقدِرُ علىٰ الوصولِ إلىٰ الجهةِ الأخرىٰ مِن الجبل، لأنه لا يملكُ الطاقةَ الكافيةَ لعُبوره. ولكنَّ هذا الجوابَ مغلوطٌ فيه! إذ إنّ ميكانيكَ الكمِّ تُقدِّمُ لنا احتمالاً آخرَ، وهو أنّ الإلكترونَ يُمكنُ أن يَشُقَّ نَفَقاً عَبْرَ الجبلِ، وُصولاً إلىٰ الجهةِ الأخرىٰ، حتىٰ لو لم يمتلكْ الطاقةَ الكافيةَ لِتَسَلُّقِ الجبلِ وعبوره. وهكذا فإنّ الإلكترونَ إمَّا أن تتمَّ إعادتُه مِن قِبَلِ الحاجزِ، أو أن يُسمَحَ له بالعبور، حيثُ توجدُ فرصةٌ محدودةٌ لِأيِّ مِن البديلَيْن. ويمكنُ حِسابُ هذهِ الاحتمالاتِ بميكانيكياتِ الكمِّ.

ولقد جاءتْ حقيقةُ أننا لا يُمكنُنا الجزْمُ بالاتجاهِ الذي **سوف** يسلُكُه الإلكترونُ، وإنما يمكننا أن نُرَجِّحَ **ما قد** يَفعلُه، جاءت ضربةً مُدَمِّرَةً للباحثينَ الذينَ شَبُّوا علىٰ تلكَ النظرةِ المُحَتِّمَةِ للميكانيكياتِ النيوتنية. وتقولُ هذهِ النظرةُ إننا، وبشرطِ امتلاكِ المعلوماتِ الكافيةِ حولَ الحالةِ الابتدائيةِ للنظام ومعرفةِ قوانينِ الحركةِ الديناميكية، يمكنُنا أن نتوقّعَ كيفيّةَ سلوكِ النظامِ في أيِّ وقتٍ مُحَدَّدٍ في المستقبَل. وعلىٰ سبيلِ المثالِ، فإنَّ حقيقةَ معرفتِنا التفصيليةِ بحركاتِ الشمسِ، والأرضِ، والقمرِ، تُمكِّنُنا مِن التنبّؤِ بكسوفِ الشمسِ وخسوفِ القمرِ، في المستقبَلِ، بِصورةٍ دقيقة. لقد جلبتْ حركاتُ الإلكترونِ للفيزياويّينَ تحدِّياتٍ علىٰ قابليتهم في التنبُّؤِ بالأنظمةِ الدقيقةِ (المُجهرية).

وبالفعلِ، فإنَّ مِثالَ الإلكترونِ ليس بالمِثال المعزول، بل إنَّه عامٌّ يشملُ ميكانيكياتِ الكَمِّ جميعاً. ويتجسَّدُ نقصُ القابليةِ علىٰ التوقّعِ هذا في ما يُعرَفُ **بمبدإِ الشَّك** **uncertainty principle** الذي أعلنه الفيزياويُّ الألمانيُّ ويرْنَر هايزنبيرغ W. Heisenberg، في عشريناتِ القرنِ العشرين، في بواكيرَ عن نشوءِ ميكانيكيات الكمّ. إنَّ ثنائيةَ أو ازدواجيةَ الموجةِ ـ الجُسيمِ، والتي نجدُها في سلوكِ الضوءِ، نجدُها في حالاتِ الجُسيمات أيضاً. وهكذا، فإننا نُجادِلُ في مثالِ الحاجزِ الذي ضربْناه، في واقعِ الحالِ، بأنّ أرجحيّةَ ما سيفعلهُ الإلكترونُ يمكنُ حسابُها بافتراضِ أنه سيسلكُ سلوكَ موجةٍ!

وحتىٰ أنَّ عالِماً عظيماً مِثْلَ ألبرت آينشتاين Albert Einestein، والذي ظهرَتْ علىٰ يديْهِ فكرةُ جُسيم الضوءِ، أو **الفوتونِ** **photon**، قد وجدَ أنَّ مِن العسيرِ عليه أن يتقبّلَ مبدأَ الشّكِّ، باعتبارِه تقييداً أساسيّاً علىٰ المقارَبةِ الحتمية deterministic approach، وُينسَبُ إليه تعليقُه بالقول: «**إنَّ اللّهَ لا يلعبُ النرد**». ولقد اعتقدَ آينشتاينُ بأنَ النقصَ الظاهرَ للحتميةِ الكاملةِ قد يعودُ إلىٰ احتواء النظام المُجهري علىٰ مُتغيِّراتٍ حَرَكيّةٍ (ديناميكيةٍ) أخرىٰ لا يُدْرِكُها القائِمُ بالتجربة. ولقد كان هناكَ أخذٌ وردٌّ طويلانِ بين آينشتاينَ وبين

نيلز بور Neils Bohr الذي أكّد على الطبيعةِ الأساسيةِ لمبدإ الشَّكِّ في الكَمِّ. ويُشيرُ استمرارُ إحياءِ هذه المجادَلةِ، بين الحينِ والآخَرِ، إلىٰ أنَّ علماءَ فيزياويّينَ كثيرينَ لا يزالونَ غير راضينَ عن هذه القضايا المعرفيّةِ أو الإدراكيّةِ. وحتّىٰ اليومِ، فلقد أخفَقَتْ كلُّ التجاربِ الباحثةِ عن وجودِ مُتغيِّراتٍ خَفِيَّة، وهكذا فإنها تقودُ إلىٰ استنتاجٍ يتماشىٰ مع مبدإِ الشَّكِّ.

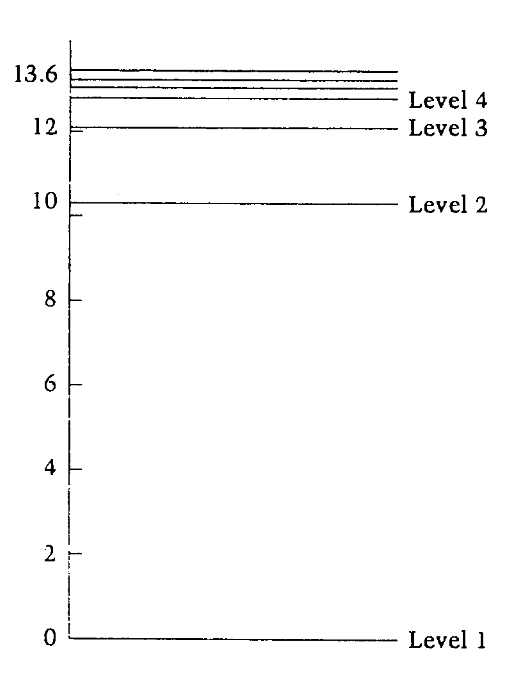
عودةٌ إلىٰ الخطوطِ الطيفية Spectral lines

لقد تَحَوَّلْنا إلىٰ مُناقَشَةِ نظريةِ الكمِّ بسببِ خطوطِ الطيفِ المُعتِمَةِ التي شاهدَها فراونهوفر. ولكنْ، كيف يُفَسِّرُ هيكلُ نظامِ الكَمِّ خطوطَ فراونهوفر؟

فَلْنتصوَّرْ، مَثَلاً، ذرّاتٍ لغازِ الهايدروجينِ تقعُ في طريقِ أشِعَّةٍ شمسيةٍ قادمةٍ إلينا، ولنفترضْ أنّ إلكتروناتِ الغازِ كلّها تقعُ في واحدٍ مِن المداراتِ الداخلية. ونحنُ نتذكّرُ بأنّ الإلكترونَ، حتىٰ يقفزَ **بعيداً** إلىٰ المَدارِ التالي (الخارجيِّ) يحتاجُ إلىٰ أن يُزوَّدَ بفَرْقِ الطاقةِ بين المداريْنِ الجديدِ والحاليّ. ويمتلكُ الإشعاعُ الشمسيُّ فوتوناتٍ ذواتِ طاقاتٍ مختلفات، **ومِن ضمنِها** الطاقةُ المحدَّدَةُ التي تساوي هذا الفرقَ. وهكذا فإنَّ هناكَ فرصةً جيدةً لِأَنْ يمتصَّ الإلكترونُ أحَدَ فوتوناتِ هذه الطاقةِ، ولِذا فإنَّه يقفِزُ إلىٰ المَدارِ الأعلىٰ طاقةً. وكنتيجةٍ لذلكَ الامتصاصِ تَحْدُثُ «فجوةٌ» في إشعاعِ الشمسِ علىٰ هذا التردُّدِ، وهو ما سيَظهرُ علىٰ شكلِ خطٍّ مُعتِمٍ علىٰ خلفيةِ الطيفِ المضيء.

ويمكنُ لعالِمِ الفيزياءِ الذرّيةِ أن يحسِبَ الطاقةَ التي يُمكنُ أن يمتلكَها إلكترونٌ ما في المداراتِ المختلفَةِ لذرّةِ الهايدروجين كلِّها. ويبيِّنُ الشكلُ ٢,١٧ «سُلَّمَ» طاقةٍ energy ladder نموذجياً (إنَّ وِحداتِ الطاقةِ المستخدَمةَ في الشكلِ يُشارُ إليها علىٰ أنها e V، أي إلكترون ڤولتات electronvolts. والإلكترون ڤولت هو الطاقةُ المحتاجةُ لدفعِ إلكترونٍ ما بمواجهةِ حاجزٍ كهربائيٍّ يتمُّ تحديدُ مقدارِهِ بفَرْقٍ للجُهْدِ يبلغُ ڤولتاً واحداً). إنَّ الارتقاءَ مِن درجةٍ إلىٰ أخرىٰ يعني امتصاصَ فوتوناتٍ ذاتِ طاقةٍ محدَّدةٍ، أي أنها ذاتُ تردُّدٍ وطولِ موجةٍ محدَّدَيْنِ. ونحنُ نتذكّرُ مِن الفصلِ الأوّلِ بأننا لو ضَرَبْنا التردّدَ في طولِ الموجةِ لحصلْنا علىٰ سرعةِ الضوء. وكمثالٍ علىٰ ذلك، فإنَّ فرقاً للطاقةِ كهذا لذرةِ الهايدروجينِ يوافقُ طولاً موجياً مِن ٦٥٦ نانومِتراً. وماذا يعني ذلك؟

إنّه يعني بأننا لو قُمنا بتفحُّصِ إشعاعِ الشمسِ، لوجدْنا بأنه مُسْتَنْفَدُ الفوتوناتِ ذاتِ الطولِ الموجيِّ هذا. وبعبارةٍ أخرىٰ، فإننا نتوقّعُ رؤيةَ خطٍّ مُعْتِمٍ في هذا الطولِ الموجيِّ.



الشكل ٢,١٧: سُلَّمُ الطاقة «energy ladder» لـــــذرةِ الهايدروجين.

وإذا ما تفحَّصْنا الطيفَ الظاهرَ في الشكل ٢,١١، لوجدْنا فعلاً خطّاً معتماً هناك! إنهُ خطٌّ يُسمّيهِ أخصائيُّ الأطيافِ بخطِّ H_α line. ولمّا كانَ الطولُ الموجيُّ لهذا الخطِّ يتطابقُ تماماً مع الطولِ الموجيِّ المحسوب، فإنّ أخصائيَّ الأطياف سيكونُ واثقاً مِنْ أنّ هذا الخطَّ قد جاءَ مِن اعتراضِ وامتصاصِ الأشعةِ الشمسيةِ مِن قِبَلِ ذرّاتِ الهايدروجينِ الموجودةِ في طريقِها.

ولَئِنْ اتّخذْنا مِن الهايدروجينِ مَثَلاً لتوضيحِ كيفيةِ عملِ هذه الطريقةِ، فإنّه يُمكِنُ أن تكونَ ثَمَّةَ، لا بلْ توجدُ فعلاً، عناصرُ أخرىٰ تسبِّبُ حدوثَ الامتصاصِ في الطيفِ الشمسيّ. ولذا فإنّ هذهِ الخطوطَ المُعْتِمَةَ تُعرَفُ **بخطوط الامتصاص absorption lines**. ويمكنُ لنا أن نستنتجَ، وبدرجةٍ كافيةٍ مِن الثقةِ، مِن خِلالِ المقارَنةِ معَ الحساباتِ النظريةِ، طبيعةَ ووَفرةَ العناصرِ الكيمياويةِ المتسببةِ في حدوثِ هذه الظاهرة. وإنّ التعرّفَ علىٰ هُويَّةِ العنصرِ الكيمياويِّ مِن خطِّهِ الطيفيِّ يُمكِنُ أن نُشبِّهَها بعمليةِ التعرُّفِ علىٰ هُويّةِ المجرمِ مِن طبعاتِ بَنانِه!

فأمّا الوَفرةُ فيُسْتَدَلُّ عليها مِن اتّساعِ الرُّقعةِ الممتدّةِ (أي الكثافةِ) لخطِّ الامتصاصِ، فكلَّما زادَ عددُ الذرّاتِ المُمتصّةِ كُلَّما قَوِيَ خطُّ الامتصاصِ. ثم إنّ بإمكاننا، وكما سوف نرىٰ بَعدَ قليلٍ، مِن خلالِ معرفةِ مدىٰ الامتصاصِ، أن نحصلَ علىٰ تقديرٍ دقيقٍ نسبياً



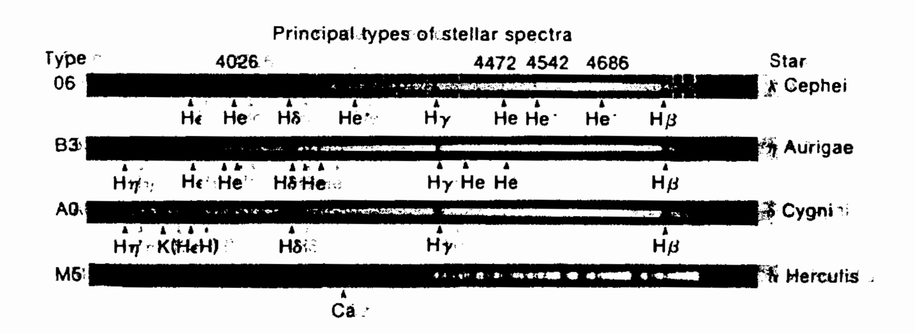
الشكل ٢,١٨ : مَغناد ساها.

لدرجةِ حرارةِ المِنطقةِ التي يَحدُثُ فيها الامتصاص. وليس مِن العسيرِ تِبيانُ أنَّ هذه المناطقَ تقعُ قريباً مِن سطحِ الشمسِ الخارجيّ. وبعبارةٍ أخرىٰ، فإنّ لدينا الآنَ أداةً تشخيصيةً لقياسِ درجةِ حرارةِ سطحِ الشمسِ وتركيبتِها الكيمياوية. وهنا تتبيّنُ قيمةُ بُحوثِ مَغناد ساها الفلكيِّ الفيزيائيِّ الهنديِّ المبكرةِ (الشكل ٢,١٨).

وحتىٰ نُقَدِّرَ عملَ ساها حقَّ قدرِه، فلننظرْ إلىٰ ما يحدثُ عند تسخينِ غازٍ ما. إنَّ الغازَ يتألفُ، في الأحوال الطبيعيةِ، مِن ذراتٍ أو جزيئاتٍ تتحركُ جُزافاً، مصطدمةً إحداها بالأخرىٰ، ثم هيَ تتبدّدُ وتتفرّق. وتصبح هذه الفعاليةُ الحركيةُ الداخليةُ أكثر استعاراً وسرعةً عندما تزدادُ درجةُ حرارةِ الغاز. وبالفعلِ، فإنَّ درجةَ الحرارةِ هيَ مُؤشّرٌ علىٰ سَعَةِ طاقةِ هذهِ الحركةِ الداخلية. وهكذا، فعندَ تسخينِ الغاز تزدادُ الاصطداماتُ وتُصبِحُ أشدَّ عنفاً، وهو ما يؤدّي إلىٰ فَلْقِ الجزيئاتِ إلىٰ ذرّاتٍ. ثمَّ إنَّ الذرةَ التي تُجَرَّدُ مِن بعضِ أو كُلِّ إلكتروناتِها تُعْرَفُ **بالأيون ion**.

قام ساها، خلالَ الأعوام ١٩١٨ ـ ١٩٢٢، بدراسةِ سلوكِ مزيجٍ لغازٍ ساخنٍ يتكوّنُ مِن ذراتٍ مُتعادلةِ الشِّحنةِ، وإلكتروناتٍ، وأيونات. ولقد توقَّعَ أن يَجدَ في الغازِ مزيجاً مِن بعضِ الذراتِ الكاملةِ، وبعضِ الأيوناتِ، وبعضِ الإلكتروناتِ الحُرّة. ثمَّ إنه توقّعَ أيضاً أن يجدَ، جَرّاءَ تسخينِ المزيجِ، أن تتضاءلَ نسبةُ الذرّاتِ الكاملة، وتزدادَ نسبةُ الأيوناتِ والإلكترونات. ولكنْ، كم تتغيَّرُ تلكَ النِّسَبُ بالضبطِ مع ارتفاعِ درجةِ حرارةِ الغاز؟ توصَّلَ ساها إلىٰ صيغةٍ تُعطي الجوابَ المضبوطَ حولَ تلكَ النسبِ في أيّةِ درجةِ حرارة. وهكذا يمكننا أن نستدِلَّ علىٰ نِسَبِ الوَفرةِ، وعلىٰ درجةِ حرارةِ المحيط.

وَإنَّ لَمِنَ المُدهشِ حقّاً أنَّ فيزياءَ الغازاتِ الساخنةِ، مُضافَةً إليها الأفكارُ الأساسيةُ لنظريةِ الكمِّ، يمكنُ أن تُزوِّدَنا بوسائلَ لتقديرِ درجةِ حرارةِ الشمس. ويُمكنُ، بالطبع، أن تُطَبَّقَ هذهِ الطريقةُ علىٰ النجوم، رغمَ أبعادِها الشاسعةِ عنا. ويُرينا الشكلُ ٢,١٩ خطوطاً طيفيةً لبعضِ النجوم، مع خطوطِ امتصاصٍ لعناصرَ مختلِفةٍ عديدة. وهكذا، فإنَّ المرءَ لَيكتشفُ، بمساعَدَةِ صيغةِ ساها، أنَّ هناكَ نجوماً تتباينُ درجاتُ حرارةِ سطوحِها تبايناً عظيماً. ولقد تمّ تصنيفُ هذهِ النجومِ إلىٰ أصنافٍ طيفيةٍ مختلفةٍ تُنْعَتُ بالحروفِ O, B, A, F, G, K, M, R, N. والنجومُ مِنَ الصنفِ O هي الأشدُّ سُخونةً (أكثرُ مِن ٣٠٠٠٠ درجةٍ مئوية)، وتحتوي علىٰ ذراتٍ متأيِّنةٍ للهيليوم، وأمّا النجومُ مِن الصنفِ N فهي الأبردُ (حوالىٰ ٣٥٠٠ درجةٍ مئوية)، وتحتوي علىٰ الكاربون. ولقد تمَّ الكشفُ عن وجودِ تشكيلةٍ واسعةٍ مِن العناصرِ الكيميائية في النجومِ مِن الأصناف الوسطىٰ.



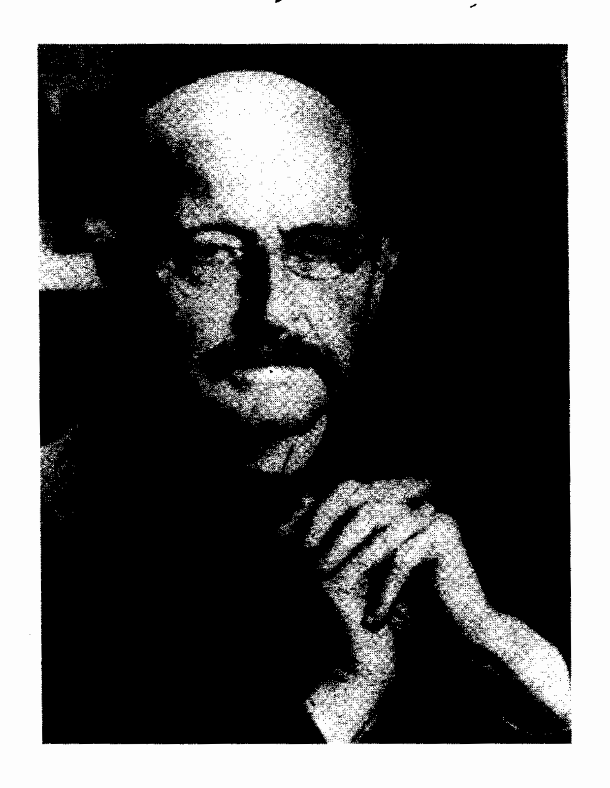
الشكل ٢,١٩: أطيافٌ لأنواعٍ مِن النجوم. تتوزعُ خطوطُ الامتصاصِ في هذهِ الأطيافِ، بصورةٍ مختلفة، وتُساعدُنا هذه علىٰ تقديرِ درجةِ حرارةِ سطوحِ هذهِ النجوم.

ألوانُ النجوم

ومِن آثارِ نظريةِ الكمِّ الأخرىٰ أنّها تمدُّنا بمعلوماتٍ إضافيةٍ عن درجةِ حرارةِ سطحِ النجم. لقد أوليْنا الاهتمامَ، حتىٰ الآنَ، بخطوطِ الامتصاصِ وحدها، ولكنْ ماذا عن الطيفِ الكاملِ المتّصِلِ ذاتِه؟ إنَّ الجزءَ المرئيَّ مِن الأشعةِ النجميةِ، وكما ذكرْنا، يظهرُ بألوانِ قوسِ قُزَحٍ، مِن البنفسجيِّ وحتىٰ الأحمر، ولكنْ بأيّةِ نسبةٍ للشِّدة؟ لو قارَنّا طيفَ نجميْنِ اثنينِ، ولنقلْ مثلاً النجمَ الساخنَ O بالنجمِ الباردِ N، فهل سنَجِدُ الضوءَ، ذا الألوانِ المختلفةِ، ممزوجاً بالنسَبِ ذاتِها في أطيافها؟ والجوابُ هو «كلا». فلسوفَ يَغلِبُ اللونُ **الأزرقُ** علىٰ النجمِ الأكثرِ سخونةً، بينما يغلبُ اللونُ **الأحمرُ** علىٰ النجم الأبرد.

وبفضلِ نظريةِ الكمِّ، فلقد صارَ مِن الممكنِ أن نفهم هذه النتيجةَ، حيثُ إنها تُنبئُنا كيف أنّ الإشعاعَ الكهرومغناطيسيَّ المحصورَ في حيِّزٍ محدودٍ يوزِّعُ نفسَه علىٰ أطوالٍ موجيةٍ مختلفةٍ. ولقد كانت دراسةُ الإشعاعِ في الحيزِ المحدودِ هي التي قادت ماكس پلانك (الشكل ٢,٢٠) إلىٰ فكرتهِ الأساسيةِ عن نظريةِ الكمِّ.

وقد يكونُ في فُرْنِ الخبزِ أحسنُ مثالٍ للإشعاعِ المحصورِ بحيزٍ محدود. افرضْ أنَّ



الشكل ٢,٢٠: ماكس پلانك
.Max Planck

فرناً قد تمَّ ضبطُه علىٰ درجةِ حرارةٍ ما، ثم تُرِكَ حتىٰ يسخنَ. سوف يتمُّ تزويدُ الفرنِ بالحرارةِ، أوّلاً، مِن العناصرِ الكهربائيةِ أو اللَّهبِ الغازيّ، والتي سوف تكونُ أكثرَ سُخونةً مِن المحيط. ولكنَّ درجةَ حرارةِ المحيطِ سوف ترتفعُ مع استلام حرارةٍ أكثرَ وأكثرَ، وسوف تنتقلُ الحرارةُ مِن المِنطقةِ الأكثرِ سخونةً إلىٰ المِنطقةِ الأبردَ، ولذا فإنها سوف تنحو إلىٰ أنْ تصيرَ ذاتَ درجةِ حرارةٍ متساويةٍ في كلِّ مكانٍ منها. وهكذا، فإنَّ الفرنَ سوف يكتسبُ، بعدَ دقائقَ قليلةٍ، درجةَ حرارتهِ المرغوبةَ، **والتي يُفترَضُ أنها متساويةٌ في كلِّ مكانٍ منه**. وإذا ما كان الفرنُ مصنوعاً بصورةٍ مُتْقَنَةٍ، فإنَّ جدرانَه سوف تكونُ عازلةً بصورةٍ جيّدة، ولن تسمحَ بأيِّ فُقدانٍ محسوسٍ لكميةِ الحرارة.

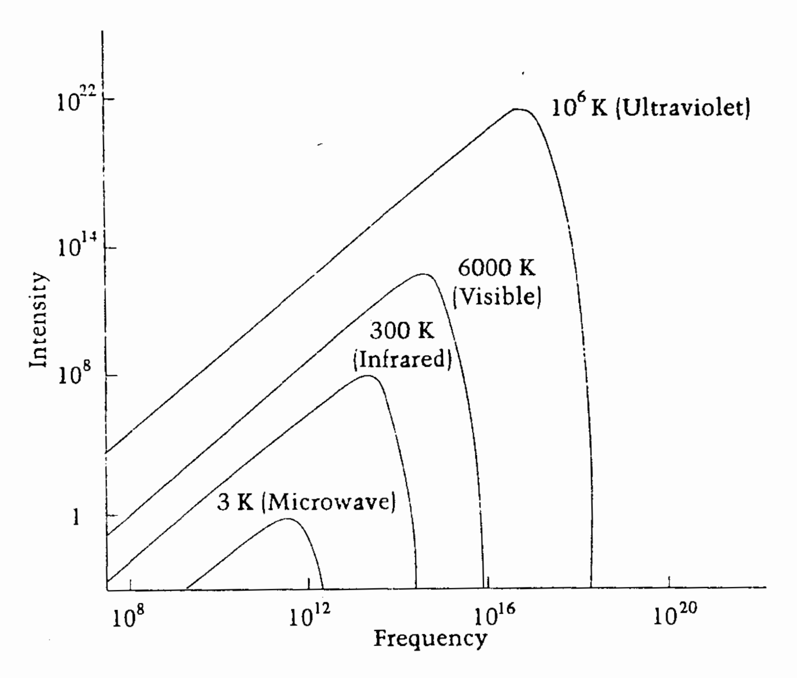
وهكذا فإنّ لدينا هاهنا أقربَ مثالٍ عمليٍّ علىٰ ما يُسمّيهِ الفيزياويُّ **إشعاعَ الجسم الأسودِ black body radiation**. فأمّا أنَّه إشعاعٌ فهو شيءٌ واضح، ولكنْ لِمَ قد أسميناهُ **بالجسم الأسود**؟ ذلكَ لأنَّ الإشعاعَ يتمُّ حصرهُ داخلَ جدرانِ المَحْبِسِ، وبصورةٍ ممتازة، بحيثُ لا يتمُّ الكشفُ عن أيِّ إشعاعٍ، بالنسبةِ إلى المُراقبِ الخارجيّ. وهكذا فلقد صارَ المُطَوَّقُ وجدرانُهُ جسماً أسود.

ولكنَّ الإشعاعَ يُبدي مَظاهِرَ مُثيرةً، داخل الجسم الأسْوَدِ، لو قُيِّضَ لنا أن نشاهدها. فالرسمُ البيانيُّ الذي يُرينا توزيعَ طاقةِ الأشعةِ علىٰ أطوالِ موجاتٍ مختلفاتٍ، مَثَلاً، يمتلكُ شكلاً مُحدَّداً (الشكل ٢,٢١).

ويوجَدُ، في الأحوال الاعتياديةِ، إشعاعٌ قليلٌ جداً، في الترددات الأدنى. ولكنَّ شِدَّةَ الإشعاع تزدادُ أيضاً، ولكنْ إلىٰ حدٍّ معيّنٍ وحَسْب، في التردداتِ الآخذةِ بالارتفاع، حيثُ إنها تأخذُ بالانخفاضِ الحادِّ بعدَ ذلك. ثم إنّ شكلَ المنحنىٰ البيانيِّ يمكنُ حِسابُهُ باستخدامِ نظريةِ الكمِّ، وهو يتحدّدُ، كُلِّيَةً، بدرجةِ حرارةِ الإشعاع.

ونرىٰ في الشكلِ منحنياتِ توزيعٍ تعودُ لأجسامٍ سُودٍ مختلفاتٍ، في درجاتِ حرارةٍ متنوِّعةٍ. ونُلاحظُ هنا أنَّ الحرارةَ كلَّما ارتفعت درجتها، كلَّما ارتفعَ منحنىٰ التوزيع. وكذلكَ فإنَّ قِمَّةَ المنحنىٰ تنحرفُ نحو اليمينِ، أي نحوَ الترَدّدِ الأعلىٰ. وكما هو مُبَيَّنٌ في الشكلِ ٢,٢١، فإنَّ الإشعاعَ يبدو أكثرَ شيءٍ علىٰ شكلِ موجاتٍ دقيقةٍ (صُغرىٰ) microwaves في درجاتِ حرارةٍ منخفضةٍ، وعلىٰ شكلِ أشعةٍ سينيةٍ (أشعةِ ـ اكس) في الدرجاتِ الأعلىٰ. ولسوفَ نعودُ إلىٰ هذا المَظهرِ بعدَ قليل.

ونتوقّفُ هنا قليلاً لمناقشةِ المقياسِ الذي نستخدمُه لقياسِ درجةِ الحرارة. نحنُ



الشكل ٢,٢١ : تُظهِرُ هذه المنحنياتُ كيف ترتفعُ شِـدّةُ الإشعـاعِ وتنخفضُ بالتناسبِ مع ترددِه. إنَّ كلَّ مُنحنىً يُمَثِّلُ جسماً أسودَ ذا درجةٍ حراريةٍ ثابتة. والتردُّدُ الذي تصِلُ الشدَّةُ فيه أقصاها يزدادُ بالتناسب مع ارتفاعِ درجةِ حرارةِ الجسمِ الأسود. وتَظْهَرُ الطبيعةُ النموذجيةُ للإشعاع بين قوسيْن.

نتكلَّمُ علىٰ درجةِ حرارةٍ مِن ٩٨,٦ فَهرنْهايت (= ٣٧ درجةً مئوية) باعتبارها درجةَ حرارةِ جسمِ الإنسانِ الطبيعيةَ، أو ١٠٠ درجةٍ مئويةٍ باعتبارها درجة حرارةِ غليانِ الماء. وتُستخدَمُ مقاييسُ فَهْرِنْهايْت «ف» Fahrenheit (°F) أوالمقاييسُ المئويةُ «م» Celius (C°)، نظراً لملاءمَتِها، ولأسبابٍ تاريخيةٍ أيضاً. أمّا بالنسبةِ إلى العالِم الفيزياويِّ فإنَّ مقياسَهُ الطبيعيَّ لدرجةِ الحرارة هو **المقياسُ المُطْلَق absolute scale**، والَذي يقيسُ طاقةَ الجسمِ الداخليةَ. وتنجُمُ هذهِ الطاقةُ عنِ الحركاتِ، والدوراناتِ، والذبذباتِ، وغيرِها مِن حركاتِ الذراتِ والجزيئاتِ المكوِّنةِ لها. وكلَّما ارتفعتْ درجةُ الحرارةِ، كلَّما ازدادتْ هذهِ الطاقةُ الداخلية. وبالعكسِ، فإنَّ هذهِ الحركاتِ الداخليةَ لسوفَ تتباطأُ إذا ما قُمْنا بتبريدِ الجسم. وتُعرَفُ الحالةُ التي تتوقّفُ فيها هذهِ الحركاتُ تماماً بحالةِ درجةِ حرارةِ الصفر، **علىٰ شرطِ أن تُقاسَ درجةُ الحرارةِ بالمقياسِ المخْلَق**. وهذا يُكافِئُ، في القياسِ المئويِّ، درجةَ حرارةٍ مِن ٢٧٣ **تحتَ الصفر**. ولسوفَ نقومُ باستخدامِ المقياسِ المطلَقِ كثيراً، لأنَّ ذلكَ أمرٌ طبيعيٌّ في مناقشتنا. ويُشيرُ الحرفُ K إلىٰ درجةِ الحرارةِ في هذا



الشكل ٢,٢٢: اللورد كالڤن.

المقياسِ، نِسبةً إلى الفيزياويِّ اللورد كالْڤِن Lord Kelvin (الشكل ٢,٢٢)، والذي لعبَ دوراً أساسياً في نشوءِ هذهِ المفاهيم. وهكذا، فإنَّ $0\ K = -273°\ C$.

ونَعودُ الآنَ إلىٰ منحنىٰ توزيعِ الجسمِ الأسود black body، إذ إنَّ الفيزياويينَ حاولوا، قبلَ أيامِ نظريةِ الكمِّ، أن يَفهموا هذا التوزيعَ، باستخدامِ النظريةِ التقليديةِ للإشعاعِ الكهرومغناطيسيِّ، ولم يُفلحوا في ذلكَ إلاّ فلاحاً جُزئياً. ولقد افترضوا، بالطبعِ، أنَّ الإشعاعَ داخلَ الجسمِ الأسودِ كانَ يتألفُ مِن ضوءٍ ذي أطوالٍ موجيةٍ مختلفة. ثم حاولوا أن يحسبوا كيفَ يمكنُ أن تشاركَ أطوالٌ موجيةٌ مختلفةٌ في الطاقةِ المتوفِّرةِ بعدَ أن يكونَ الأخذُ والعطاءُ الأوّليانِ قد أدّيا إلىٰ ثباتِ الوضع. ولقد وجدوا أنّ بإمكانهم أن يستخرجوا الجزءَ الأيسرَ مِن المنحنىٰ مِن دونِ الجزءِ الأيمن. وهكذا فلقد توقّعتِ النظريةُ التقليديةُ أن تستمرَّ الشِّدةُ في ازدياد تردّدِها، مِن دونِ أن تهبطَ أبداً! ولقد أدّىٰ ذلكَ إلىٰ الموقفِ المُنافي للعقلِ في توقُّعِ استمرارِ الجسمِ الأسودِ في إشعاعِ الطاقةِ إلىٰ ما لا نهايةَ ـ ويُعرَفُ ذلكَ بفاجعةِ الأشعةِ فوقَ البنفسجيةِ ultraviolet catastrophe.

وعلىٰ أيةِ حالٍ، ومعَ افتراضِ پلانك بأنّ الضوءَ لا يتكونُ مِن مجرَّدِ موجاتٍ ولكنه يتمُّ توزيعُهُ أيضاً علىٰ شكلِ رزماتٍ packets مِن الطاقة، أيْ كَمّاتٍ quanta، فلقد صارَ

مِن الممكنِ التوصّلُ إلىٰ التوزيعِ المشهود. وإنَّه لَيُمْكِنُكَ أن تُخمِّنَ، فِعلاً، قيمةَ ثابتِ بِلانك h (انظُرْ ما سَبَقَ في القِسم) مِن هذهِ الدراسات.

ولكنكَ قد تتساءلُ الآنَ إنْ كانَ في مقدورِ شخصٍ ما أن يُشاهدَ فعلاً ما الذي يحدثُ داخلَ الجسمِ الأسود. أَوَلَيْسَ داخِلُهُ معزولاً عنِ المُشاهدِ الخارجيّ؟ إنّ هذهِ الملاحظةَ لَهِيَ صحيحةٌ فعلاً، ولقد يحتاجُ المرءُ أحياناً إلىٰ القَبولِ بالأمورِ الوسَطِ! ولنفترضْ أننا قد أحدثْنا ثُقوباً صغيرةً عديدةً في الجُدران، وقمنا بجمعِ الإشعاعِ الخارجِ منها. وإذا ما كانتِ الثقوبُ صغيرةً، فإنكَ لا تكادُ ترىٰ في الداخلِ كميةَ الإشعاعِ الخارجةَ، لأنَّ حالةَ التوازنِ هناكَ لن تتأثّرَ بصورةٍ ملحوظة. علىٰ أنَّ بإمكانِنا أن نقومَ بفحصِ الإشعاعِ المتفلِّتِ إلىٰ الخارج، وهو ما سيُعطينا دَلالةً علىٰ الحالةِ في الداخل.

وإذا ما فتحْنا بابَ الفُرْنِ، في المثالِ الذي جئنا بهِ عنِ الفُرْنِ المُسخَّنِ، حتىٰ نعلمَ مدىٰ سخونَتِهِ، فلَسَوْفَ تُفْلِتُ إشعاعاتُه إلىٰ الخارجِ، مُسَبِّبَةً حالةً مِن اختلالِ التوازن. إلاّ أنَّ أداةً فعّالةً لقياسِ درجةِ حرارةِ الفُرنِ سوفَ تضمنُ أنّ عمليةَ القياسِ لن تسبِّبَ اختلالاً في حالةِ التوازن.

ولقد أدَّتْ هذه الدراساتُ التجريبيةُ، حولَ إشعاعِ الجسمِ الأسودِ، والتي قامَ بها فيزياوِيّو ما قبلَ عهدِ الكمّ، إلىٰ نتيجةٍ مُثيرةٍ حول توزيعِ القِمَم، في الشكل ٢,٢١. إنَّ قِمَّةَ الترَدّدِ تتناسبُ بالضبطِ معَ درجةِ حرارةِ الجسمِ الأسود. ويُعرَفُ هذا القانونُ باسمِ واين W. Wien، الذي اكتشفَهُ عام ١٨٩٤. ولا تُقاسُ درجةُ الحرارةِ هنا بالمقياسِ المئويِّ أو الفهرنهايتيِّ، بل بالمقياسِ المُطلقِ.

وعلىٰ سبيلِ المثالِ، فإذا كانت درجةُ حرارةِ الجسم تبلُغُ 3K، فلسوفَ تحدثُ قِمّةُ الترَدّدِ بمعدّلِ ٣٠٠ ألفِ مِليونِ دورةٍ في الثانيةِ الواحدة، أمّا إذا كانتْ درجةُ الحرارةِ عَشْرَةَ أضعافِ ذلك، فستكونُ قِمّةُ الترددِ عَشْرَةَ أضعافِ ذلكَ أيضاً، أي ٣ ملايين مِليونَ دورةٍ في الثانيةِ الواحدة.

وهكذا نرىٰ أنَّ الترَدُّدَ، في قِمَّتِهِ العاليةِ يتوافقُ معَ درجةِ حرارةٍ عالية. وإذا ما تذكرْنا، مِنَ الفصلِ الأولِ، بأنَّ اللونَ الأزرقَ يمتلكُ ترَدّداً أعلىٰ مِنَ الأحمر، فإننا سوفَ نجدُ، بالمِثْلِ، أنَّ شِدَّةَ اللونِ الأزرقِ تتغلّبُ علىٰ شدّةِ الأحمرِ، في درجاتِ الحرارةِ العاليةِ نسبيّاً، ويحدثُ العكسُ بالنسبةِ إلى درجاتِ الحرارةِ المنخفضة.

وما هو شأنُ ذلكَ بالنجوم؟ إنَّهُ لَكذلكَ، لأنَّ النجومَ تُشابِهُ الأجسامَ السوداء جداً.

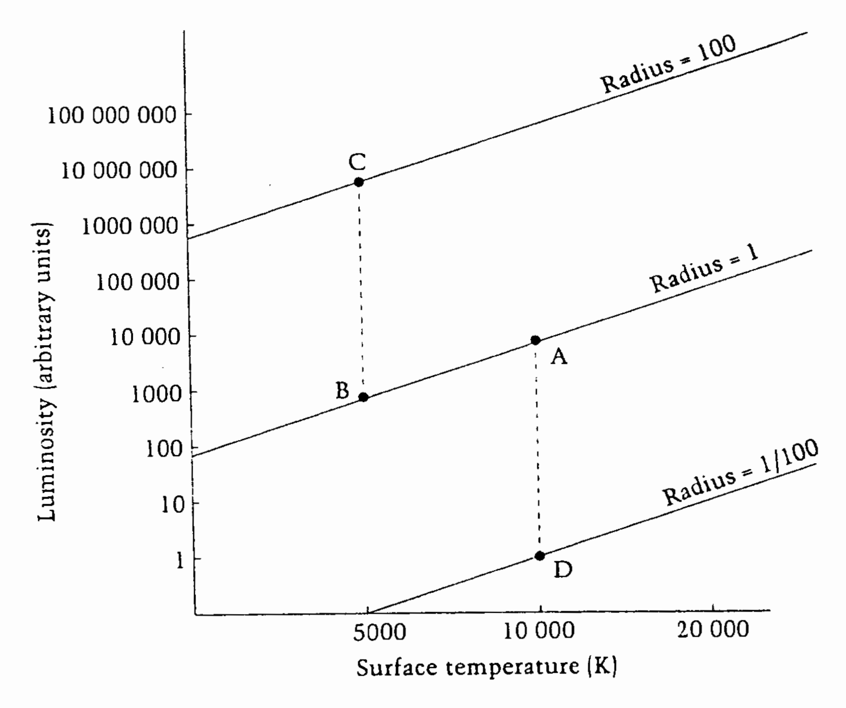
وقد يبدو ذلكَ متناقضاً، إذ كيفَ يُمكنُ أن يكونَ جسمٌ مُشِعٌّ كَمَثَلِ جسم أسود؟ ولكنْ فلنتذكر المَثَلَ الذي ضربناهُ بالفُرْنِ ذي الثقوبِ القليلةِ الصغيرة، فما دامَ تَسَرُّبُ الإشعاعِ مِنَ الفُرْنِ صغيراً إلىٰ الدرجةِ التي لا يختلُّ معها توازنُه الداخليُّ، فإنَّ التشبيهَ بالجسمِ الأسودِ لَهُوَ أمرٌ معقول. وفي حالةِ النجمِ المتوهّجِ، فإنّ سَرَيانَ الإشعاعِ الخارجِ مِن سطحهِ ليسَ عالياً بما يكفي للإخلالِ بحالةِ التوازنِ في الطبقاتِ السفلىٰ منه. وهذا يتفقُ تماماً معَ ما توصلْنا إليهِ سابقاً. وهكذا يصيرُ في إمكانِنا أن نُفسحَ مكاناً لِطَيْفِ النجمِ المستمرِّ في منحنىٰ الجسمِ الأسود، حتىٰ نُقَدِّرَ درجة حرارةِ النجم، وهذا يتّفقُ تماماً معَ ما قد توصّلْنا إليهِ سابقاً مِنَ خطوطِ امتصاصِ الطيف. وإننا لَنرىٰ هنا أيضاً السببَ في أنّ النجومَ الزرقاءَ هي أكثرُ سُخونةً مِن النجومِ الحمراء.

أحجامُ النجوم

إنَّ حقيقةَ كونِ النجومِ تشعُّ مِثلَ النجومِ السوداء، وبشكلٍ تقريبيٍّ علىٰ الأقلّ، تُمكِّنُ العالِمَ الفلكيَّ مِن تقديرِ أحجامِها، وهو ما يوضّحُهُ الشكل ٢,٢٣ الذي يُرينا مُخطَّطُهُ كميةَ الإشعاعِ الخارجةَ مِن كُراتٍ لأجسامٍ سوداءَ تختلفُ في أنصافِ أقطارِها، ولكنها تملكُ درجةَ الحرارةِ ذاتَها. ويُقابلُ كلُّ خطٍّ غيرُ متقطِّعٍ في هذا المخطَّطِ نصفَ قطرٍ واحداً. وكلما سِرنا علىٰ طولِ الخطِّ، نحوَ اليمينِ، كلّما واجهْنا نجوماً ذواتِ درجاتِ حرارةٍ أعلىٰ وإضاءاتٍ luminosities أكبر. وكلّما زادَ نصفُ القطرِ كلّما تحرّكْنا إلىٰ خطٍّ أعلىٰ. وهكذا فإنّ نجميْنِ اثنينِ يمتلكانِ أنصافَ الأقطارِ ذاتَها، ولكنْ درجاتِ حرارةٍ للسطحِ مختلفةً، لَسَوْفَ يشعّانِ بصورةٍ مختلفة، إذْ إنّ النجمَ الذي يمتلكُ درجةَ حرارةِ سطحٍ أعلىٰ سوف يكونُ الأكبرَ في قدرةِ إضاءَتِه.

فلننظرْ إلىٰ النجومِ الثلاثةِ A و B و C، في الشكلِ ٢,٢٣، لِغرضِ المقارنةِ بينها. إنَّ النجميْنِ A و B يمتلكانِ نصفَ القطرِ ذاتَه، ولكنَّ درجةَ حرارةِ A تبلغُ ضِعفَ تلك التي يمتلكُها B. ومِن ثمَّ سيكونُ A أكبرَ في إضاءتِهِ بِستَّعَشْرَةَ مرَّةً مِن B. ولكنَّ سطحَ النجمِ C يمتلكُ درجةَ الحرارةِ التي يمتلكُها B ذاتَها، إلاَّ أنَّهُ يمتلكُ نصفَ قطرٍ أكبرَ بمائةِ مرّة. وهكذا فَلَسَوْفَ يكونُ C متوهجاً بعشرةِ آلافِ مرّةٍ قَدْرَ B.

ولْننظرِ الآنَ إلىٰ النجميْنِ A و B. فَمِنَ الناحيةِ الواحدةِ فإنَّ A هو أكثرُ إضاءةً بكثيرٍ مِن B، والسببُ في ذلكَ هو أنَّ درجةَ حرارتهِ السطحيةَ أعلىٰ بكثير. ومِن الناحيةِ الأخرىٰ، فإنَّ D يمتلكُ درجةَ الحرارةِ ذاتَها التي يمتلكها النجمُ A، ولكنَّ إضاءَتَهُ أقلُّ



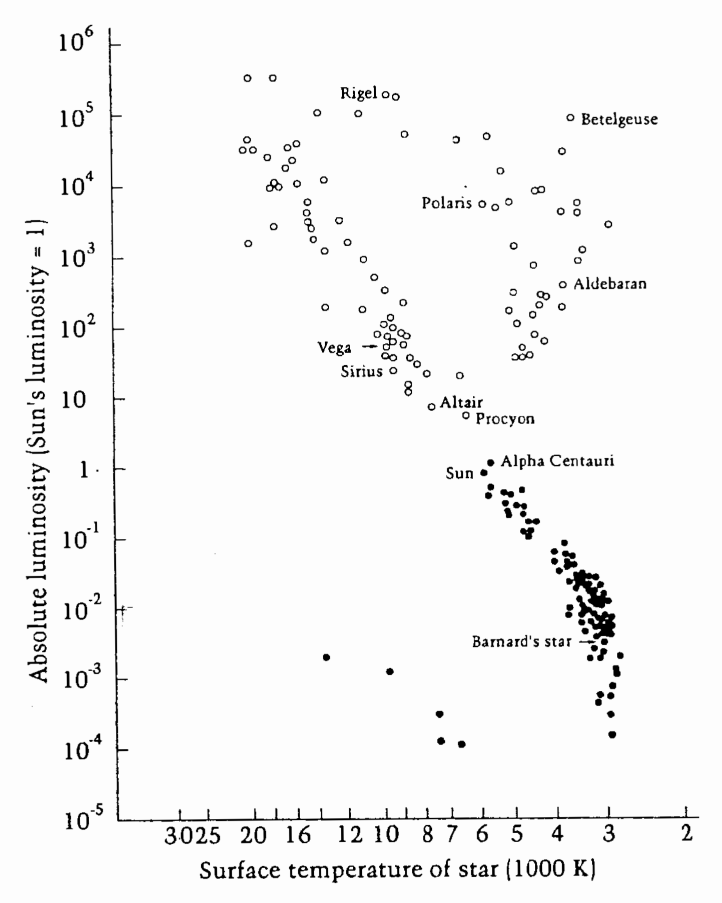
الشكل ٢,٢٣ : يُظهِرُ كلُّ خطٍّ مائلٍ، في هذا الشكلِ، كيف أنَّ الإشعاعَ الكليَّ مِن أجسامٍ سوداءَ لها أنصافُ الأقطارِ ذاتها، ولكنْ بدرجاتِ حرارةٍ مختلفةٍ، يعتمدُ على نصفِ القطرِ. وتُظهرُ الخطوطُ المختلفةُ كيفَ أنَّ هذه العَيِّنَةَ مِن الإشعاعِ تتغيرُ مع تغيّرِ نصفِ القطرِ.

بكثيرٍ، فلماذا؟ ومثلما حدثَ معَ الزوجيْنِ C و B، فإننا نستنتجُ بأنَّ نصفَ قطرِ النجمِ D يبلغُ حوالىٰ جزءٍ مِن مائةِ جزءٍ مِن نصفِ قطرِ A.

وهكذا يصيرُ لدينا عَرْضٌ مُقارَنٌ حولَ أنصافِ أقطارِ النجومِ A و B و C و D، **فحجمُ النجمِ D أصغرُ بمائةِ مرّةٍ مِن حجمِ النجمِ A، والنجمانِ A و B يمتلكانِ الحجمَ ذاتَهُ، ولكنَّ النجمَ C أكبرُ بمائةِ مرّةٍ من A أو B.**

فلننظرِ الآنَ إلىٰ المخطَّطِ هـ ـ ر[1] H-R diagram، وقد استُنْسِخَ هنا، مكرَّراً، في الشكلِ ٢,٢٤، وَلْنُقارِنْهُ، بوجهٍ عامٍّ، بصورةٍ في المرآةِ للشكلِ ٢,٢٣. وإذا ما دَعَوْنا النجميْنِ A و B، في التتابُعِ الرئيسيِّ، نجوماً **اعتيادية normal stars**، فلسوفَ نَنْظُرُ حينئذٍ إلىٰ النجمِ D، باعتبارِهِ أصغرَ بكثيرٍ مِنَ الطبيعيِّ، علىٰ أنّه نجمٌ **قَزْمٌ dwarf star**، بينما

(١) الحرفانِ هـ ـ ر يُشيرانِ إلىٰ الاسمينِ: هيرتزبرانغ وراسل، انظرْ الصفحة ٤٦.



الشكل ٢,٢٤: مُخَطَّطُ هـ ـ ر H - R diagram منقولاً مِن الشكل ٢,٤.

سوفَ نُشيرُ إلىٰ النجمِ C علىٰ أنه **عملاقٌ giant**.

وهكذا فإنَّ لدينا تشكيلةً واسعةً مِن الأحجامِ، في عالَمِ النجوم، وهي تشكيلةٌ أوسعُ بكثيرٍ ممّا نجدُهُ في الناس. إنَّ امتدادَ أطوالِ البشَرِ، مِن أصغرِ رضيعٍ مولودٍ حديثاً، إلىٰ أطولِ البالغين، لا يختلفُ بأكثر مِن العاملِ O. أمَّا بالنسبةِ إلىٰ النجومِ، فإنَّ مدىٰ أنصافِ أقطارِها، مِنَ القزمِيّ إلىٰ العملاقةِ منها، يمتدُّ إلىٰ أكثر مِن العاملِ ١٠٠٠٠٠٠.

ولذا فإنَّ المخطَّطَ هـ ـ ر يُعطينا مؤشِّراً واضحاً علىٰ مدىٰ التباينِ الموجودِ في جمهرةِ النجوم. وهو لا يُجيبُ بالطبعِ علىٰ السؤالِ الذي نوَدُّ أن نطرحَه الآن، وهو: كيفَ نشأتْ هذهِ التشكيلةُ المُتنَوِّعة؟ هل إنَّ النجومَ تُولَدُ كما نجدُها عليهِ في المخطَّطِ هـ ـ ر؟ أم إنَّ النجمَ النموذجيَّ يمُرُّ عَبْرَ حالاتٍ عديدةٍ مختلفةٍ في أثناءِ نشوئِه، ومِن

ضمنِها حالتُه عندما يكونُ «طبيعياً»، أو «عملاقاً»، أو «قزماً»؟ إنَّ التقدمَ الملحوظَ الذي أنجزَهُ فيزياويّو النجوم خلالَ القرنِ العشرين لَيُمكِّنُنا مِن الإجابةِ علىٰ هذا السؤالِ بوضوحٍ وإحكام. وكما سنلاحظُ بعدَ قليلٍ، فإنَّ المفتاحَ يكمنُ في الجوابِ علىٰ السؤالِ الأساسيِّ: **ما الذي يجعلُ النجومَ تشعُّ؟**

سِرُّ طاقةِ النجومِ

قد يكونُ هذا السؤالُ واحداً مِن أقدمِ الأسئلةِ التي أثارتْ فضولَ البشر. وبالتأكيدِ، وفيما يخصُّ الشمسَ بالذاتِ، وبالنظرِ إلىٰ قُدرتِها الإشعاعيةِ الهائلة، فإنَّه ليسَ مِن المدهشِ أنَّ القدماءَ قد قدّسوا هذا الجِرمَ السماويّ. ويشهدُ معبدُ الشمسِ الكبيرُ في كوناراك، في الساحلِ الشرقيِّ من الهندِ، بمثلِ هذه المعتقدات (الشكل ٢,٢٥).

ولكنْ، ومع بزوغ فجرِ العلم الحديثِ في القرنِ السابع عشر، فلقد ابتدأتِ النظرةُ الآليّةُ mechanistic view[1][2] بالانتشار. ولقد سادَ الاعتقادُ بأنّ الظواهرَ الطبيعيةَ لا بُدَّ أن تَجِدَ، في نهايةِ المَطافِ، تفسيراً لها علىٰ شكلِ قوانينَ للعلم أساسيّة ولكنْ قليلة، في علم الفَلَك. ولقد اكتسبَ **قانونُ حِفظِ الطاقة law of conservation of energy**، بالأخَصِّ، مكانةً عالمية.

وينصُّ هذا القانونُ علىٰ أنّ الطاقةَ الكليّةَ المشارِكةَ في أيةِ عمليةٍ تتمُّ المحافظةُ عليها دائماً، إذ إنها لا تفنىٰ ولا تُستحدَث.

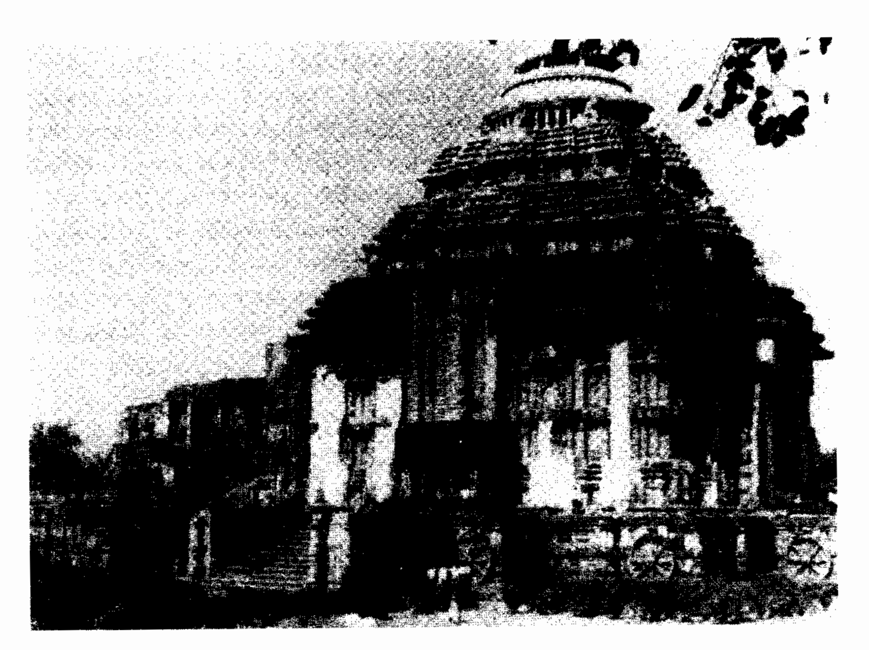
وهكذا، وحتّى نطبِّقَ هذهِ النظريةَ علىٰ الشمسِ، فمعنىٰ ذلكَ أنّ في داخلِ الشمسِ مصدراً تُكتَسَبُ الطاقةُ منه، مصدراً لا بدَّ أن يُسْتَنْفَدَ معَ مرورِ الوقت. فما هو ذلكَ المصدر؟

حاولَ عالِمانِ فيزياويانِ بارزانِ أن يُجيبا علىٰ هذا السؤالِ، في القرنِ التاسع عشر،

---

(١) المذهب الآليّ هو المذهب القائل بأن العمليات الطبيعية (كالحياة) قابلة للتفسير بنواميس الفيزياء والكيمياء. د.س

(٢) ﴿والسماء بنيناها بأييد وإنا لموسعون﴾ [الذاريات: ٤٧]، ﴿أمْ خُلِقوا مِن غيرِ شيءٍ أم هم الخالقون. أم خلقوا السمٰوات والأرض بل لا يوقنون﴾ [الطور: ٣٥، ٣٦] صدق اللّه العظيم. أي أم إنها جاءت لحالها مِن دون مُسبِّبٍ ولا خالق. يتفقُ العلماءُ، اليومَ، علىٰ أنَّ الكونَ قد ابتدأ وجودُه بـ «الانفجارِ العظيم» مِن حجم متناهٍ في الصِّغَر، فمِنْ أينَ جاءت مكوّناته؟ ومَن ذا الذي خَلَقَها، أي أوجدَها مِن العَدَم، وقدَّرها، غيرُ اللّهِ الخالقِ سبحانه؟ د.س

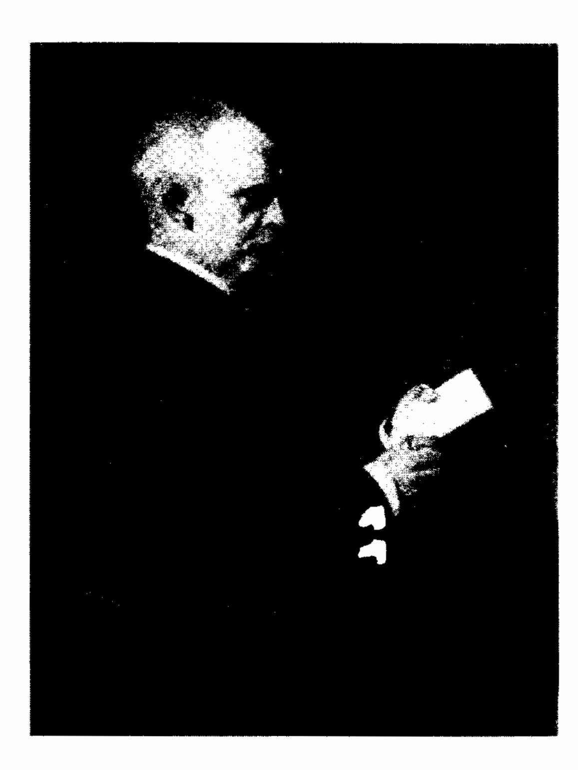


الشكل ٢,٢٥ : معبدُ الشمسِ في كونارك، في شرقيِّ الهند، يُمَثِّلُ الشمسَ وهي تستقِلُّ مركبةً عظيمة.

وهما الألمانيُّ بارون ڤون هيلمهولتز Baron Von Helmholtz (الشكل ٢,٢٦)، والبريطانيُّ اللورد كالڤِن (الشكل ٢,٢٢)، واللَّذانِ مَرَّ علينا اسماهُما، عند كلامِنا على مقاييسِ درجةِ الحرارةِ المطلقة. ولقد استندَ حَلُّهُما إلىٰ مخزونِ طاقةِ الجاذبيةِ gravitational energy التي يمتلكُها أيُّ جسمٍ عظيم. فَلْنستطرِدْ قليلاً حتىٰ نرىٰ ما هوَ هذا المخزون.

ولسوفَ نستكشفُ، في الفصلِ الخامسِ، الأعاجيبَ الكثيرةَ التي تترافقُ معَ الظاهرةِ التي ندعوها **بالجاذبيةِ الأرضية gravitation**. ولكننا سنُحدِّدُ أنفسَنا بالمظهرِ الأساسيِّ للغايةِ، لقوةِ الجاذبية، وكما بيَّنَهُ إسحق نيوتن Isaac Newton، في بحثِهِ المعنونِ **بقانونِ الجاذبية law of gravitation**، في القرنِ السابع عشر. ومن اليسيرِ أن نبسطَ هذا القانونَ، ولكنْ وكما سوفَ نرىٰ في الفصلِ الخامسِ، فإنّ له تضميناتٍ مهمة. وينصُّ هذا القانونُ علىٰ **أنَّ أيَّ جسمينِ ماديّينِ يتجاذبانِ بقوةٍ تتناسبُ طردياً مع حاصلِ ضربِ كتلتيهما، وعكسياً مع مربّعِ المسافةِ بينهما.**

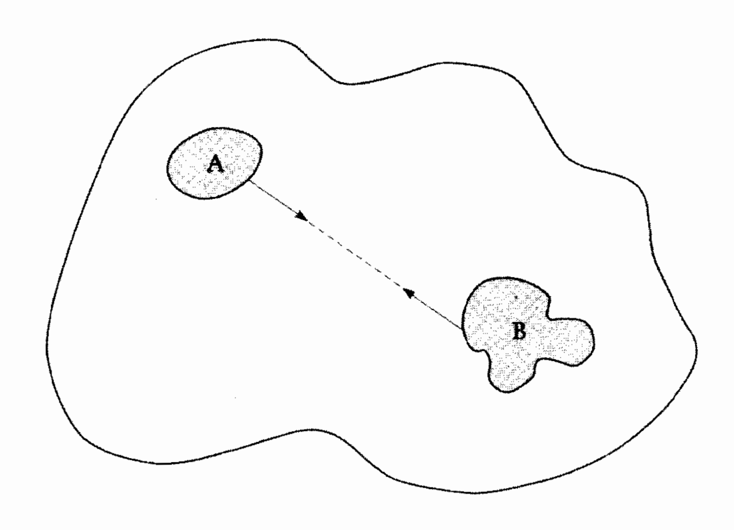
ويُقاسُ المحتوىٰ الماديُّ لجسمٍ ما **بكتلته mass**. ونحنُ نستخدمُ في حياتِنا اليوميةِ



الشكل ٢,٢٦: البارون ڤون هيلمهولتز.

وحدة **الكيلوغرام** لقياسِ الكتلة. فلنفترضْ أنَّ لدينا الجسميْنِ A و B، وأنّ كتلةَ كلٍّ منهما تبلغُ كيلوغراماً واحداً، وأنَّ المسافةَ الفاصلةَ بينهما تبلغُ مِتراً واحداً، مثلاً. لسوف تكونُ هناكَ، حسَبَ قانونِ نيوتن للجاذبية، قوّةٌ مُحَدَّدَةٌ للتجاذبِ ما بينَ A و B. ولو أحللْنا الجسمَ C، وبكتلةِ ١٠ كيلوغراماتٍ مثلاً، بَدَلَ الجسمِ A، فإنَّ قوةَ التجاذبِ بينَ C و B سوفَ تكونُ ١٠ أضعافِ قوةِ التجاذبِ ما بينَ A و B. وبالمثلِ، فإذا ما زِدنا المسافةَ بين A و B إلىٰ ١٠ أمتارٍ فلسوفَ تقِلُّ قوةُ التجاذبِ بالعاملِ ١٠×١٠، أي بالعاملِ **مائة** (تذكّرْ أننا واجهْنا، قبلاً، فكرةَ التناسبِ العكسيِّ مع مربّعِ القيمةِ، في موضوعِ قابليةِ الإضاءة luminosity).

فلنطبِّقْ قانونَ التجاذبِ علىٰ جسمٍ كرويٍّ عظيمٍ، كالشمس. ولسوفَ نرىٰ في الشكل ٢,٢٧ جُزأيْنِ اثنينِ نموذجيّيْنِ لهذا الجسمِ، هما A و B. وحسبَ قانونِ الجاذبيةِ، فإنَّ الجُزءَيْنِ سوفَ يجذبُ أحدُهُما الآخرَ، ولذا فإنهما سوفَ يقتربانِ الواحدُ مِن الثاني علىٰ طولِ الخطِّ المستقيمِ الواصلِ بينهما. ولكنْ فلنتذكرْ بأنّ كلاً من A و B أجزاءٌ نموذجيةٌ، وهكذا فإنَّ القاعدَةَ ذاتَها تنطبقُ علىٰ أيِّ جزءَيْنِ آخريْنِ مِن الشمس. وستكونُ النتيجةُ انجذاباتٍ إلىٰ الداخلِ في باطنِ الشمسِ تؤدّي بها إلىٰ الانكماشِ إلىٰ



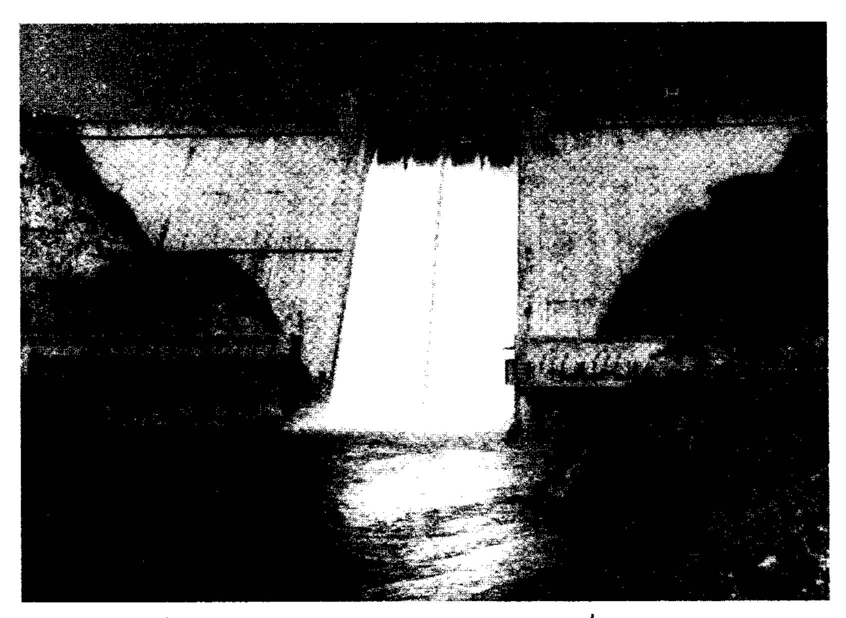
الشكل ٢,٢٧ : إنّ أيَّ جزءٍ مِن الجُزْءَيْنِ A و B، مِن جسم عظيم، سوف يتجاذبانِ، وهكذا سوف يَنْحُوانِ إلىٰ الاقترابِ الواحدُ من الآخر، علىٰ طولِ الخطِّ الواصلِ بينهما. إنَّ المَنحىٰ النهائيَّ لمثلِ هذهِ القِوىٰ التجاذبية هو جَعْلُ الجسمِ ينكمش.

حجمٍ أصغر. ولسوفَ تسنحُ الفرصةُ لنا، في الفصلِ الخامسِ، للتوسّعِ في موضوعِ مَيْلِ الأجسامِ العظيمةِ هذا.

وتُشاركُ هذهِ النزعةُ ذاتُها في تكوينِ مخزونِ الطاقةِ التجاذبيةِ للشمس. ويُعبِّرُ الفيزياويونَ عن ذلك الميْلِ للحركةِ نحوَ الداخلِ بالقولِ بأنّ المستودَعَ الاحتياطيَّ يمتلكُ **طاقةً كامنة potential energy**. إننا نواجهُ مستودَعاً كهذا فيما يُعرَفُ **بالسَّدِ الجاذبيّ gravity dam**، والذي نراهُ في الشكل ٢,٢٨. ويوجَدُ في مثلِ هذا السدِّ مستودَعٌ عالٍ للماءِ، ويتحدَّرُ الماءُ منهُ إلىٰ أسفل. وبسببِ قوةِ الجاذبيةِ نحوَ مركزِ الأرضِ يكتسبُ هذا الماءُ المتحدِّرُ سرعةً، ولذا يمكنُ استخدامهُ لتشغيلِ التوربينات(١)، لتوليدِ الطاقة الكهربائيةِ في محطّاتِ الطاقةِ الكهرومائيةِ.

والسَّدُّ الجاذبيُّ هو مثالٌ ممتازٌ علىٰ تحويلِ الطاقةِ والمحافظةِ عليها. إنَّ الطاقةَ الأصليةَ للماءِ هي طاقةٌ جاذبيةٍ، ويعودُ ذلكَ إلىٰ موقعِ الماءِ العالي، وتتحولُ هذه إلىٰ طاقةٍ حركيةٍ عندما يتحدَّرُ الماءُ، ثم تتحوّلُ الطاقةُ الحركيةُ، في نهايةِ المطافِ، إلىٰ طاقةِ

(١) التُوربين turbine: محرِّكٌ ذو دولابٍ، يُدارُ بقوةِ الماءِ أو البخارِ أو الهواء، لتوليدِ الطاقةِ الكهربائيةِ. د.س

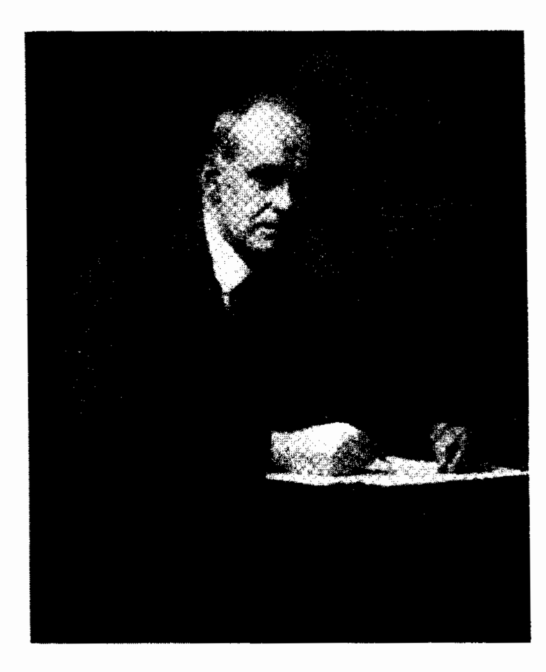


الشكل ٢,٢٨ : هذا السَدُّ، في بَهاكرا نانجال، في البنجاب، هو أحدُ أطولِ السدودِ في العالَم.

كهربائية. وعلىٰ أيّةِ حالٍ، فإنّ مجموعَ الطاقةِ يبقىٰ هو ذاته، إذ إنَّ الطاقةَ لا تغيّرُ إلاّ شكلَها وحَسْب.

وكذلكَ توجَدُ، وبالطريقةِ ذاتِها، طاقةُ جاذبيةٍ، في الكتلةِ الكرويةِ، ويمكنُ الحصولُ علىٰ هذهِ الطاقةِ بجعلِ الكرةِ تنكمشُ. ولقد اعتقدَ كالڤن وهيلمهولتز أنَّ الطاقةَ التي تشعّها الشمسُ تأتي مِن هذا المخزون. تخَيَّلْ ماضِيَ الشمسِ، عندما كانت أكثرَ امتداداً وانتشاراً. ومِن خِلالِ المَيْلِ الجاذبيِّ الذي ذكرناهُ عن تقلُّصِ حجم الكرةِ الممتدةِ إلىٰ حجمِ الشمسِ الحاليِّ، تتحرّرُ الطاقةُ. وهذه الطاقةُ يمكنُ تقديرُها، إذ وُجِدَ بأنها تكفي لإبقاءِ الشمسِ مُشِعَّةً لنحو ٢٠ مليونَ عام.

ولسوءِ الحظِّ، فبينما أُثبِتَ في النهايةِ بأنَّ فترةَ ٢٠ مليونَ عام هي فترةٌ طويلةٌ جداً بالنسبةِ إلى عمرِ الحضارةِ الإنسانيةِ، فإنها ليست طويلةً بما يكفي للشمس. ذلكَ لأنَّ تحديدَ تاريخِ النيازكِ meteorites والصخورِ الأرضيةِ يدُلُّنا على أنّ عمرَ المنظومةِ الشمسيةِ يبلغُ ٥,٥ بلايينِ عام تقريباً، وهو دليلٌ علىٰ أنّ الشمسَ كانت تشعُّ، وبثباتٍ، وبمعدَّلِ إشعاعِها الحاليِّ، لفترةٍ تقرُبُ مِن ذلك. ومِن الواضحِ أنّ وصفةَ كالڤن ــ هيلمهولتز لا تكفي لتلبيةِ هذا المطلب.



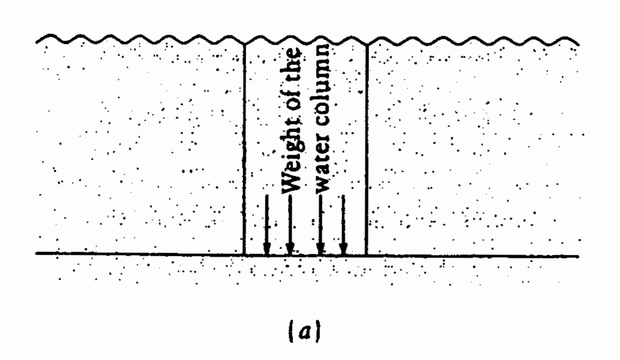
الشكل ٢,٢٩: آ. س. أدنغتن.

وهكذا فلقد عادتِ المعضلةُ إلىٰ أدراجِ الباحثين، مرّةً أخرىٰ، في عشرينات القرنِ العشرين، ونعني بها معضلةَ أن نَجِدَ مصدراً للطاقةِ هوَ مِن الضخامةِ بحيثُ أنه يكفي لإبقاءِ إشعاعِ الشمسِ في معدَّلِهِ الحاليِّ خمسةَ بلايينِ عامٍ أخرىٰ على الأقل.

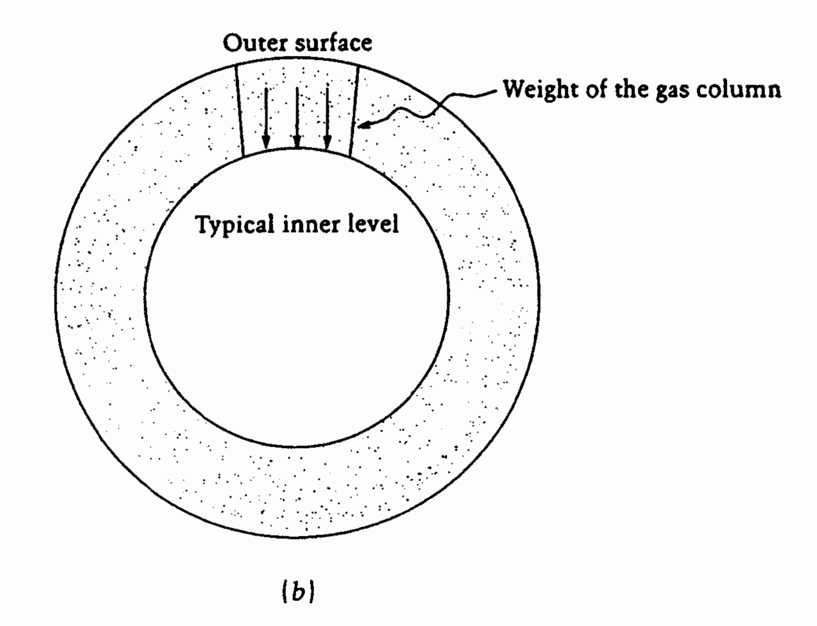
ولقد توصّلَ الفيزياويُّ الفلكيُّ آرثر ستانلي أدنغتن A.S. Eddington. مِن كامبريدج، إلىٰ الحلِّ الصحيح، مِن خلالِ بحوثهِ علىٰ تركيبِ الشمسِ الداخليّ. تَصَوَّرَ أدنغتنُ الشمسَ علىٰ أنها كرةٌ ساخنةٌ مِن الغازِ تتماسكُ أجزاؤُها بفعلِ قوةِ جاذبيتها الذاتية، وكما تخيّلْنا نحن. ثُمَّ قام أدنغتن بوضعِ نظامٍ لمُعادَلاتٍ يتّصِلُ ببِنيةِ النجم الداخلية. ولن ندخلَ في التفاصيلِ التقنيةِ لذلكَ هنا، ولكننا سوفَ نُشيرُ، رغمَ ذلكَ، إلىٰ الدليلِ الذي قادَ أدنغتن إلىٰ إماطةِ اللِّثامِ عن مصدرِ طاقةِ الشمسِ الغامض.

وحتىٰ نفهمَ بُرهانَهُ فلننظرْ إلىٰ مِثالٍ نراهُ يومياً، وهو غَطّاسُ البحرِ العميقِ الذي ينفذُ إلىٰ أعماقٍ سحيقةٍ تحتَ الماءِ. إنَّ أحدَ الآثارِ التي سيُحِسُّ بها الغطّاسُ هو ارتفاعُ ضغطِ الماءِ عليه، كلّما هو زادَ عمقُه تحتَ الماء. وسوف يصيرُ الضغطُ، علىٰ عمقِ ١٠ أمتارٍ تقريباً، ضِعفَ ما هوَ عليهِ عندَ سطحِ البحر. ويستمرُ الضغطُ في الازديادِ، وبالمُعَدَّلِ نفسِه، أي أنّه سوفَ يصيرُ ثلاثةَ أضعافه في مستوىٰ ٢٠ مِتراً، وأربعةَ أضعافٍ علىٰ بُعْدِ ٣٠ مِتراً تحتَ سطحِ الماء، وهكذا. فلماذا؟

إنّ الضغطَ، في مستوىٰ سطحِ البحرِ، هوَ نتيجةٌ لعمودِ الهواءِ الجويِّ الذي يحملُهُ سطحُ الأرض. وكما أننا نحسُّ بأوزاننا لأننا مجذوبونَ كلُّنا بقوةِ جاذبيةِ الأرض، نحوَها، فكذلكَ يمتلكُ الهواءُ الرقيقُ فوقَنا وزناً مِثلَنا. إنَّ الضغطَ، وبكلٍّ بساطةٍ، هو هذا الوزنُ مقسوماً علىٰ وحدةِ مساحةِ سطحِ الأرض. ويبلغُ الضغطُ الذي يمارسُهُ الغلافُ الجويُّ وزنَ عشرةِ آلافِ كيلوغرامٍ تقريباً، مَوُزَّعاً علىٰ مِساحةٍ مربعةٍ مِن مِترٍ واحد (انظرْ الشكل ٢,٣٠ «أ»).



(a)



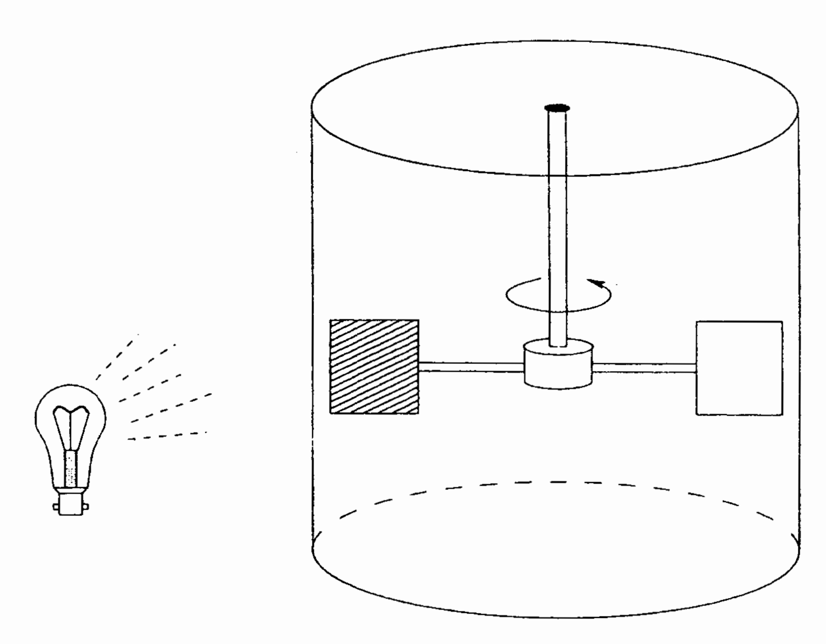
(b)

الشكل ٢,٣٠: نرىٰ في (أ) أنّ الضغطَ يزدادُ في عمقِ البحر، لأنَّ أيَّ سطحٍ أفقيٍّ في ذلكَ المستوىٰ يتوجبُ عليهِ أن يتحملَ وزنَ عمودِ الماءِ فوقَه. أما في (ب) فإنّنا نرىٰ بأنّ الموقفَ ذاتَهُ يوجدُ داخلَ النجم، وأنّ الضغطَ يزدادُ كلّما اتجهْنا نحو مركزِ النجم.

ويتوجبُ علىٰ غوّاصِنا العميقِ أن يتحمَّلَ ليسَ وزنَ عمودِ الهواءِ هذا وحدَه، وإنما وزنَ الماءِ فوقَه أيضاً. ويزدادُ الأخيرُ كلما غاصَ نحوَ القاعِ أكثرَ وأكثر. ولكنْ، ما عَلاقةُ ذلكَ كلِّهِ بنجمٍ كالشمس؟

إنَّ الضغطَ يزدادُ داخلَ النجم، وكما نرىٰ في الشكلِ ٢,٣٠ (ب)، كلّما سِرْنا أعمقَ وأعمقَ نحوَ داخلِ النجم، مثلَما يزدادُ الضغطُ كلّما تعمّقْنا في البحر. والفرقُ بينَ البحرِ وبينَ النجمِ هو أنَّ النجمَ يتكوَّنُ مِن الغاز، بينما أنَّ البحرَ سائلٌ. وتُنبئُنا إحدىٰ معادلاتِ أدنغتن كيفَ أنَّ الضغطَ داخلَ الغازِ يتناسبُ معَ درجةِ حرارتِه وكثافتِه.

وهناكَ فرقٌ آخرُ بينَ النجمِ وبينَ البحر، إذْ كما اكتشفَ أدنغتن، فإنَّ في داخلِ النجمِ لَمخزوناً هائلاً مِن الإشعاع، وإنَّ للإشعاعِ نفسِه لَضغطاً. وتُرينا اللعبةُ المبينةُ في الشكلِ ٢,٣١ أنّه حتىٰ الإشعاعُ الصادرُ عن بُصَيْلَةِ المصباحِ الكهربائيِّ يُمارِسُ ضغطاً. إنّ الألواحَ تَعكِسُ الضوءَ في إحدىٰ جهتيها، وتمتصُّهُ في الأخرىٰ. وتُضفي العمليةُ السابقةُ دفعاً أعظمَ علىٰ اللوحِ مِن العمليةِ اللاحقة، ويقومُ صافي ضغطِ الإشعاعِ بتحريكِ الألواح. وبالمِثلِ، فإنَّ علينا أن نُضيفَ ضغطَ الإشعاعِ إلىٰ ضغطِ الغازِ في أعماقِ الشمسِ



الشكل ٢,٣١: إنَّ الضوءَ الموجّهَ علىٰ هذهِ اللعبةِ ذاتِ اللوحِ الرقيقِ سوف يجعلُها تدورُ بسببِ ضغطِ الإشعاعِ علىٰ الأوراق المعدنية.

الداخلية. ويقودُنا كلا الشكليْنِ مِن الضغطِ إلىٰ نتيجةٍ مفادُها أنّه كلما زادَ الضغطُ نحوَ الداخلِ، كلّما زادتْ درجةِ الحرارةِ كذلك.

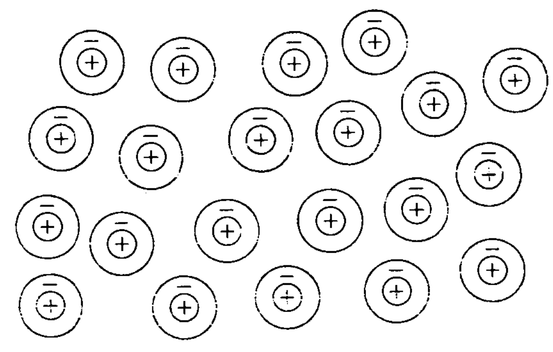
ونُلاحظُ بأنَّ درجةَ الحرارةِ علىٰ سطح الشمسِ تبلغُ حوالىٰ ٥٧٥٠ ك (5750 K)، ولذا فإنَّ درجةَ الحرارةِ في مركزِها سوفَ تكونُ أعلىٰ مِن ذلك. ولقد أعطتْ حساباتُ أدنغتن الجوابَ الرائعَ وغيرَ العاديِّ، في أنَّ درجةَ الحرارةِ في مركزِ نجم كالشمسِ سوف تكونُ أكثرَ مِن **١٠ ملايين درجةٍ**. ولم يحدثْ قَطُّ مِنْ قَبْلُ أنْ قد جاءَ بَشرٌ بدرجةِ حرارةٍ عاليةٍ لجسمٍ فيزياويٍّ كالتي جاءَ بها أدنغتن!

وعلىٰ أيّةِ حال، فإنَّ هناكَ شيئاً ما ناقصاً في صورةِ الشمسِ الكاملةِ هذهِ. إذ ما الذي حافظَ علىٰ مِثْلِ تلكَ الدرجةِ الحراريةِ لِلُبِّ الشمسِ، وجَهَّزَها بتلكَ الطاقةِ التي تشعُّها؟ لقد كانَ مِن الجَلِيِّ أنَّ الحساباتِ تُشيرُ إلىٰ مصدرٍ للطاقةِ في لُبِّ الشمسِ يقومُ بالاثنينِ في آنٍ.

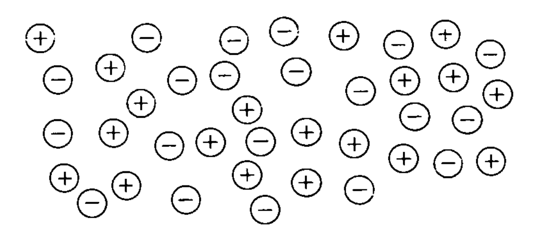
وَتَذَكَّرَ أدنغتن اقتراحاً لِـ جي. پيرين J. Perrin، فقامَ الآنَ يقترحُ كيفَ قد أمكنَ للشمسِ أنْ تتدبّرَ أمرَ إنتاجِ مثلِ هذهِ الطاقةِ العظيمة كلَّ هذا الزمنِ الطويل. وكانت حُجَّتُهُ باختصارٍ، كالآتي:

إنَّ أخَفَّ ذرَّةٍ في الطبيعةِ هي ذرّةُ الهايدروجين، إذ تتكوّنُ مِن پروتونٍ وإلكترون. ولكنَّ هذهِ الذرّاتِ لا يمكنُها أن تحافظَ علىٰ بِنيتِها في درجاتِ حرارةِ الشمسِ العالية، فهي سوف تخسرُ إلكتروناتها مِن خلالِ الاصطداماتِ العنيفةِ التي تحدثُ فيها كثيراً. وهكذا فلسوفَ توجدُ نَوىٰ تلكَ الذراتِ هناكَ وهيَ تطوفُ بحرّيةٍ، إضافةً إلىٰ بحرٍ مِن الإلكترونات. إنَّ حالةَ المادةِ هذهِ، والتي تنفصلُ فيها إلكتروناتُ الذرّةِ عن نَواها تُعرَفُ **بحالةِ البلازما plasma state** (انظرْ الشكل ٢,٣٢).

والذرةُ المستقرَّةُ، والأعلىٰ في كتلتِها بعد الهايدروجين، هي ذرةُ الهيليوم heliom، وهي تحملُ بروتونيْنِ اثنين، وبالإضافةِ إلىٰ ذلكَ، جُسَيْمَتَيْنِ اثنتيْنِ مُحايدتي الشحنةِ تُدعيانِ **بالنيوترونات neutrons**. ولقد وُجِدَ بأنَّ كتلةَ نواةِ الهيليوم أقلُّ بقليلٍ مِن مجموعِ كُتَلِ نوىٰ أربعِ ذراتٍ مِن الهايدروجين. وهنا قالَ أدنغتن بأننا لو افترضْنا بأنّ نوىٰ أربعِ ذراتِ هايدروجين قد اتحدتْ في عمليةٍ نوويةٍ فتحولتْ إلىٰ ذرةِ هيليوم، فما الذي حدثَ للكتلةِ المفقودة، أي الكتلةِ الناقصة mass deficit؟ إنَّ قانونَ تكافؤِ المادةِ والطاقةِ الذي جَسَّدَتْ خصائصَهُ الأساسيةَ معادَلةُ آينشتاين الشهيرة $E = Mc^2$ (أي الطاقة = الكتلة ×



(أ) جسيماتُ غازٍ في درجاتِ حرارةٍ معتدلة.



(ب) بلازما في درجةِ حرارة مرتفعة.

الشكل ٢,٣٢: قد تفقِدُ الذرةُ، في درجاتِ الحرارةِ العاليةِ، بعضَ أو كلَّ إلكتروناتِها، فتبقىٰ علىٰ شكلِ **أيونٍ** موجَبِ الشّحنةِ. إنَّ المجموعةَ المؤتلِفةَ للإلكتروناتِ والأيوناتِ تُكوِّنُ ما يُعرَفُ بحالةِ المادةِ البلازمِيّة plasma state of matter. ونرىٰ في (أ) مجموعةً مِن ذرّاتِ غازٍ محايدَةِ الشحنةِ في درجاتِ حرارةٍ معتدلة، أمّا في (ب) فنرىٰ نوىٰ الذراتِ وقد تمَّ فَلْقُها وتَحَوَّلَ الغازُ إلىٰ حالةِ البلازما.

مربَّع سرعةِ الضوء) يُخبرُنا بأنَّ المادةَ الناقصةَ سوف تظهرُ علىٰ شكلِ طاقة. **وهذه هي الطاقَةُ المتوفرةُ للشمسِ حتىٰ تشعَّها**.

ولا تشكّلُ الطاقةُ التي تتواجدُ بهذا الشكلِ إلاَّ جزءاً ضئيلاً من الطاقةِ التي تُكافئُ كتلةَ أربعِ ذراتٍ من الهايدروجين. وبالفعلِ، فإنَّ الحساباتِ الحديثةَ تبيِّنُ لنا بأنّ ٧ أجزاءٍ فقط مِن ١٠٠٠ جزءٍ هي ما يتوفّرُ لغرضِ الإشعاع. وعلىٰ الرغمِ مِن ذلك، فإنَّ هذا المخزونَ لهوَ عظيمٌ جداً، حيثُ إنَّه لَمْ يُدِمِ الشمسَ خمسةَ بلايينَ عام وحَسْب، بل إنه يكفيها لستةِ بلايينَ عام أخرىٰ. (ويمكنُ لنا أن نكوِّنَ فكرةً ما عن عَظمةِ مصدرِ هذه الطاقة، بمقاييسنا الأرضيةِ، مِن حسابِ أنَّ كيلوغراماً واحداً مِن وَقودِ الهايدروجينِ المستخدَمِ في التفاعلاتِ الاندماجيةِ يمكنُ أن يُديمَ عملَ مُوَلِّدٍ للطاقةِ بقوةِ ميغاواط

«= مليونَ واط» يعملُ باستمرارٍ لمدة عشرين عاماً).

ولكنَّ عِلْمَ فيزياءِ الذرّةِ كان، في عشريناتِ القرنِ العشرينِ، عِلماً ناشئاً، ولم تَكُنْ طبيعةُ القوةِ التي تربطُ النيوتروناتِ والبروتوناتِ إلىٰ النواةِ قد عُرِفَتْ بَعْدُ. وبالنسبةِ إلى علماءِ فيزياءِ الذرةِ، في ذلكَ الوقتِ، فلقد كانت أفكارُ أدنغتن باديةَ الغرابة.

ويمكنُ لنا أن نرىٰ مَثَلاً علىٰ تلكَ العوائقِ التي حالتْ دونَ تَقَبُّلِ تلكَ الأفكار. نحنُ نعلمُ بأنَّ الشحناتِ الكهربائيةَ المتشابهةَ تتنافرُ مع بعضِها البعض، وأنَّ قوةَ التنافرِ، أو التباعدِ، هذهِ تتناسبُ عكسياً مع مربّعِ المسافةِ بينهما (لاحِظْ أنّ لدينا، مرَّةً أخرىٰ، قانونَ التناسُبِ العكسيِّ، ولكننا نتكلمُ الآنَ، وعلىٰ غيرِ ما هوَ عليهِ الحالُ مع الجاذبيةِ، علىٰ قوةِ التنافر.) فكيف يمكنُ إذاً لنوىٰ ذراتِ الهايدروجين، والتي هي بروتوناتٌ موجبةُ الشِّحنةِ، أن تقتربَ مِن بعضِها البعضِ، بما يكفي، حتىٰ تلتصقَ معاً لتكوينِ نواةِ الهيليوم؟

كانت حُجَّةُ أدنغتن بأنّ البروتوناتِ، وفي درجاتِ الحرارةِ المرتفعةِ جداً في الشمسِ، لا بدَّ أن تكون حركتُها في غايةِ السرعةِ، بحيثُ لا يُسْتَبْعَدُ أن يمكنَ لاثنتينِ منهما أن تتغلّبا علىٰ العائقِ الذي يتمثّلُ في قوّةِ التنافرِ، فيقتربُ البروتونانِ الواحدُ مِن الآخرِ بما يكفي لالتحامهما بقوةٍ نَواتيّةٍ لَم يُعْرَفْ لها مَثيلٌ مِن قَبْلُ. وعارضَ علماءُ الفيزياءِ الذريةِ هذا الاستنتاجَ، واعتقدوا بأنّ درجةَ الحرارةِ لن تكونَ عاليةً جداً بما يكفي للمساعدةِ علىٰ حدوثِ مِثلِ هذا التفاعل.

ونجدُ في كتابِ أدنغتن الكلاسيكيِّ **internal constitution of the stars**، أي **البِنيةَ الداخليةَ للنجوم**، والذي ألّفهُ في أوائلِ عشريناتِ القرنِ العشرين، الرّدَ التاليَ علىٰ منتقدي نظريتهِ الذرية:

> نحنُ لا نتجادلُ مع المنتقِدِ الذي ينبئُنا بأنَّ النجومَ ليست ساخنةً بما يكفي لهذا الغرض. إننا نخبّرُه بأن يذهبَ ويجدَ مكاناً أكثرَ سخونةً...

ولقد تمَّ التغلُّبُ علىٰ هذا الخلافِ، في نهايةِ المطافِ، لصالحِ أدنغتن. وفي أواخرِ ثلاثيناتِ القرنِ العشرين كانت الفيزياءُ الذريةُ قد تطورت إلىٰ الحدِّ الذي صارتْ معهُ طبيعةُ الالتحامِ النوويِّ أكثرَ فهماً. إنَّ قوةَ الجاذبيةِ ما بينَ جُسيماتِ الذرةِ، أي البروتوناتِ والنيوتروناتِ، تعملُ مِن دونِ اعتبارٍ لكونِ الجسيماتِ مشحونةً كهربائيةً أم لا. ثُمَّ إنّ مدىٰ هذهِ القوةِ قصيرٌ جداً، إذ إنَّها تكفُّ عن العملِ في المدىٰ الذي يزيدُ علىٰ جزءٍ

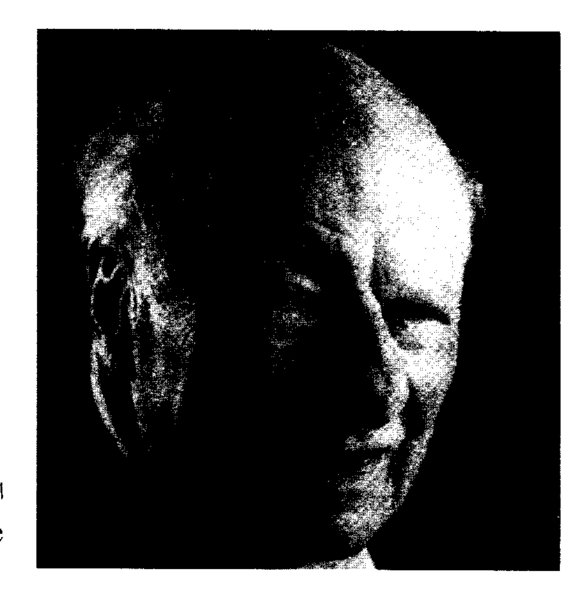
واحدٍ مِن ألفِ مليونِ مليونِ جزءٍ مِن المِتر. أمّا داخلَ هذا المدىٰ فإنها قويةٌ جداً، وإلىٰ الدرجةِ التي تجعلُها تقهَرُ التنافرَ الكهربائيَّ بين البروتوناتِ في النواة.

وهكذا، ففي درجاتِ الحرارةِ التي تزيدُ علىٰ عشرةِ ملايين درجةٍ، **يمكنُ** لبروتونيْنِ اثنينِ أن يقتربا مِن بعضهما بما يكفي حتىٰ يَقَعا في شَرَكِ القوةِ النووية، ومِن خِلالِ مثلِ هذا الاندماجِ، في مراحلَ عديدةٍ، تتكوّنُ النواةُ الأكبرُ للهيليوم في لُبِّ الشمس. وصارَ في إمكانِ هانز بيث Hans Bethe (الشكل ٢,٣٣)، وهو عالِمٌ في فيزياءِ النواة، في ١٩٣٨ ـ ١٩٣٩، أن يستخدمَ هذهِ المعلوماتِ لتكوينِ أنموذجٍ تصوّريٍّ كاملٍ للشمس.

البُرهان

قد يبدو ذلكَ كلّه، بالنسبةِ إلى الشخصِ العاديِّ، أمراً مُثيراً ولكنْ تأمُّلِيّاً بحتاً. إذ كيف يمكنُ لنا أن نعرفَ حقاً إنْ كانَ اندماجٌ نوويٌّ كذاكَ هو ما يحدثُ فعلاً داخلَ الشمس؟ كيف يمكننا أن نتأكدَ إن كان أُنموذجُ الشمسِ المصنوعُ هذا صحيحاً بدرجةٍ معقولة؟

وكذلكَ فإنَّ مِثلَ هذهِ الأسئلةِ لَهُوَ أمرٌ محتَّمٌ في العِلم أيضاً. إنَّ النظريةَ العلميةَ يتوجبُ فحصُها مِن خلالِ الملاحَظة، قَبْلَ أن نتقبَّلَها باعتبارِها أمراً معقولاً. ولقد أعطتِ النظريةُ، في حالةِ أدنغتن، علاقةً متفرّدةً بين كتلةِ النجمِ وإضاءته luminosity، إذ كلّما

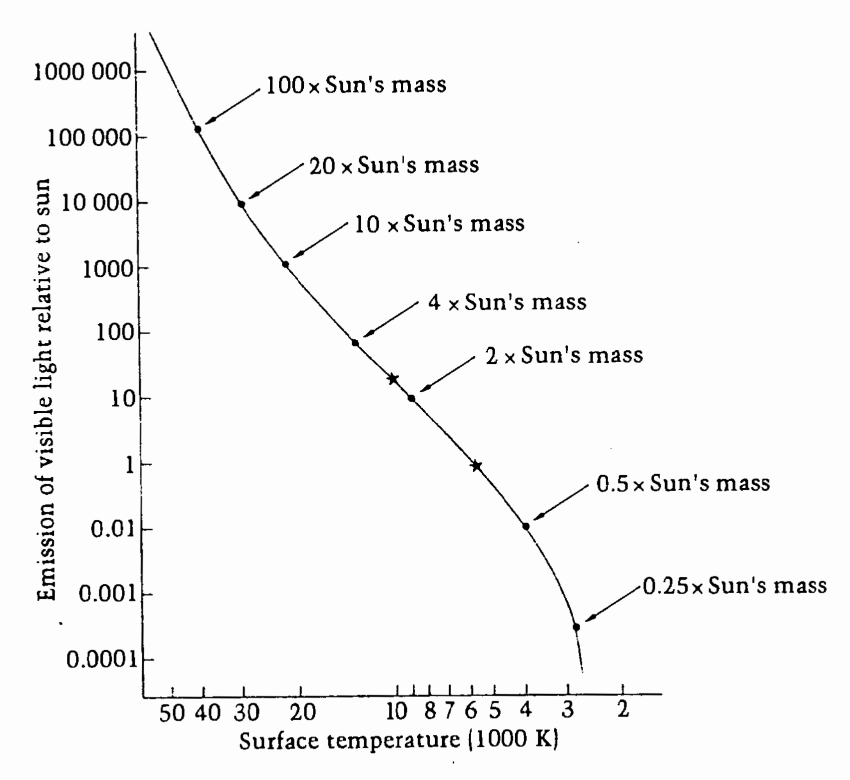


الشكل ٢,٣٣: هانس بيث
.Hans Bethe

ازدادتِ الكتلةُ كلَّما ازدادتِ الإضاءةُ. وبالمِثلِ، فلقد توقَّعَتِ النظريةُ علاقةً ما بين الكتلةِ ونصفِ القطرِ. وأمّا في حالة الشمسِ، فإنَّ الفلكيينَ يمكنُهم أن يقدِّروا كتلةَ الشمسِ مِن جذبِها للأرضِ والكواكبِ السيارةِ الأخرىٰ. وهكذا يمكننا أن نقدِّرَ إضاءةَ الشمسِ ونصفَ قطرِها، وأن نضعَها في مُخطَّطِ هـ ـ ر H - R diagram، **استناداً إلىٰ اعتباراتٍ نظريةٍ محضة**. ثمَّ يمكنُنا أن نقارنَها مع موقِعِها الذي حصلنا عليه مِن خلالِ المشاهدةِ. ويتوافقُ هذانِ الاثنانِ مع بعضهما بصورةٍ ممتازة. وليسَ ذلكَ وحدَه، إذ لو قُمنا بهذا التمرينِ النظريِّ علىٰ نجوم ذاتِ كُتَلٍ أخرىٰ أكبرَ أو أقلَّ مِن كتلةِ الشمسِ، فلسوفَ نحصلُ علىٰ منحنىً نظريٍّ علىٰ مخطّطِ هـ .ر مِنَ النوعِ الذي نراهُ في الشكل ٢,٣٤. إنّ مقارَنةً مع الشكل ٢,٤ تُنبئُنا بأنّ هذا المنحنىٰ ليسَ إلاّ التتابعَ الرئيسيَّ main sequence ذاتَه، المخطَّطِ هـ .ر.

وهكذا يصيرُ لدينا ليسَ فقط برهانٌ علىٰ صحّةِ النظريةِ، بل وأيضاً معرفةُ السببِ في وجدانِنا للنجومِ علىٰ التتابعِ الرئيسيّ. ولكن، هل يمكنُ لنا أن نكونَ طموحينَ بأكثر مِن ذلك، فنبحثَ عن إثباتٍ، أقوىٰ مِن ذلك، علىٰ النظرية؟ وبالخصوصِ، هل ثَمَّةَ أيَّةُ وسيلةٍ يمكنُ أن نقيسَ بها، بالفعلِ، درجةَ حرارةِ قلبِ الشمس؟ قد يبدو ذلكَ مِمّا لا يمكنُ التفكيرُ فيه، ليسَ لأنَّ باطنَ الشمسِ هو مِمّا لا يمكنُ الوصولُ إليه وحَسْب، بلْ لأنَّه مِمّا لا يمكنُ النظرُ إليهِ أيضاً. إنَّ جِرْمَ الشمسِ يؤلِّفُ كرةً معتمةً تمنعُنا مِن رؤيةِ ماذا يحدثُ في باطِنها. وعلىٰ الرغم مِن ذلكَ، فلقد وجدَ الفلكيونَ طريقةً يلتفّونَ بها حولَ هذهِ العقبة. ولسوفَ نؤجِّلُ هذا التمرينَ إلىٰ الخاتمةِ، لأنه يولِّدُ لُغزاً جديداً لم يُمْكِنْ حَلُّهُ بعدُ.

لا بَلْ إنّ مِثالَ الشمسِ لَيَدُلُّنا علىٰ سبيلٍ للوصولِ إلىٰ حلٍّ لمعضلةِ الطاقةِ التي تُواجهُ الجنسَ البشري الآن. إنَّ المصادرَ النِفطيةَ الكيمياويةَ لكوكبِنا محدودةٌ، وهي قد لا تدومُ طويلاً. ويقولُ البعضُ بأنها قد تكفينا قروناً معدوداتٍ، بينما يقول الآخرونَ، متشائمينَ، إنها سوفَ تُسْتَنْفَدُ خلالَ عقود، ولذا يتوجّبُ علينا أن نبحثَ عن مصادرَ أخرىٰ لتلبيةِ حاجتِنا مِن الطاقة. هل يمكنُنا أن نقومَ بالعمليةِ التي ما فتئتِ الشمسُ تقومُ بها منذُ أمدٍ بعيدٍ، في مختبَرٍ علىٰ الأرض؟ لقد تمَّ فعلاً تجريبُ هذهِ العمليةِ التي تُعْرَفُ **بالاندماج النوويّ الحراريّ thermonuclear fusion** (أي اندماجُ نَوىٰ الذرّاتِ في درجاتِ الحرارةِ العالية) في المختبر. ولقد تمَّ الحصول توّاً علىٰ نسخةٍ مُتفجِّرةٍ مُعدَّلةٍ مِن تلكَ العمليةِ، ألا وهيَ القنبلةُ الهايدروجينيةُ hydrogen bomb، وبإمكاناتٍ تدميريةٍ هائلة. وما نحتاجُ



الشكل ٢،٣٤: يمكنُ مقارنةُ هذا المنحنىٰ النظريّ، الذي يُرينا كيف تتغيّرُ الإضاءةُ luminosity، ودرجةِ حرارةِ السطحِ، باختلافِ كتلةِ النجوم، بالتتابعِ الرئيسيّ للمخطَّطِ هـ.ر للشكل ٢،٤.

إليه هو نسخةٌ معدّلةٌ مِنها مُسَيْطرٌ عليها. ويتوجبُ علينا أن نجِدَ وسيلةً للحصولِ علىٰ ناتجٍ ثابتٍ مِن الطاقةِ مثلَما تفعلُ الشمس.

وللشمسِ، في هذهِ الحالةِ، ميزةٌ عظيمة لا يمتلكُها البشر، إذ إنها تُنتِجُ، بسببِ كتلتِها العظيمةِ، ضغوطاً كبيرةً للجاذبية تُمْسِكُ بالبلازما الساخنةِ الموجودةِ في قلبِ الشمسِ في حالةِ توازنٍ ثابت. ومِن دونِ اعتمادٍ للبشرِ علىٰ مِثْلِ هذه الجاذبيةِ ذاتِ القوّةِ العظيمةِ، فإنَّ اختبارَ الذكاءِ الإنسانيِّ يكمنُ في الحصولِ علىٰ سيناريو بديلٍ يقومُ بتجهيزِ بلازما ساخنةٍ ولكنْ مستقرّة. وقد يكونُ ذلكَ، إذا ما هو تمَّ إنجازهُ فعلاً أعجوبةَ العِلْمِ والتقنيةِ الحديثة.

ونعودُ إلىٰ معضلةِ طاقةِ الشمسِ ذاتِها، إذْ كم عساها أن تدومَ مع الطاقةِ الحراريةِ النوويةِ المتوفّرةِ لها، بالشكلِ الذي وصفناه؟ إنَّ الحساباتِ تُشيرُ، وكما ذكرْنا مِن قَبْلُ، إلىٰ أن مخزونَ الشمسِ مِن الطاقةِ لم يكنْ كافياً حتىٰ تدوم منذُ خمسةِ بلايين عامٍ وحتىٰ

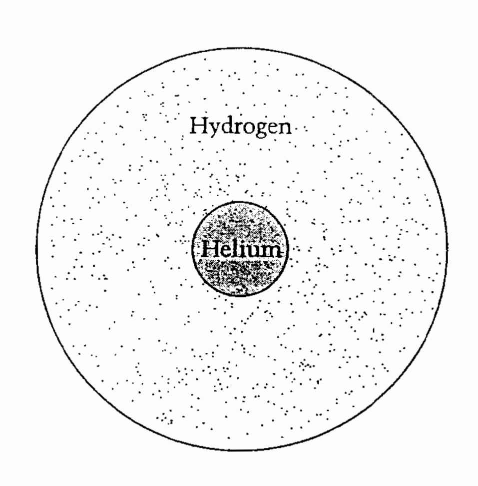
اليومَ، وحَسْب، **ولكنه يكفي لستةِ بلايين عام أخرىٰ قادمةٍ**. إنَّ الزمنَ الذي يُمْكِنُ فيه للنجم أن يسحبَ مِن مخزونهِ الهايدروجينيِّ يعتَمدُ علىٰ كتلته، فالنجومُ الأضخمُ حجماً تدومُ أزماناً أقصرَ بينما تستمرُّ النجومُ الأصغرُ فتراتٍ أطول.

العمالقةُ الحُمْر Red giants

رغمَ طولِ عمرِ النجوم، فإنَّ مِن المنطقيِّ أن نتساءلَ عمّا سوف يحدثُ للنجم عندما يَستنفدُ هايدروجينَه الذي يندمجُ مكوِّناً الهيليوم، وغلافاً خارجياً يتألفُ مِن الهايدروجين. نحنُ نتذكرُ بأنَّ درجةَ حرارةِ النجم تَزيدُ علىٰ عَشْرِ ملايين درجةٍ في قلبهِ، بينما هي تنخفضُ إلىٰ آلافٍ قليلةٍ مِن الدرجاتِ في سطحِ غلافِ النجم. وهكذا، ورغمَ وجودِ الهايدروجينِ في النجم، فإنه سوف يكونُ أبردَ مِن أن يندمجَ مكوِّناً الهيليوم، وهذا هو السببُ في توقُّفِ إنتاجِ النجمِ للطاقة.

وفي غيابِ الطاقةِ المنبعثةِ مِن مركزِ النجم، فإنه لن يعودَ قادراً علىٰ الصمودِ أمامَ شَدِّهِ الجاذبيِّ نحو الداخل. ذلكَ لأنَّ الضغوطَ العظيمةَ للإشعاعِ والمادةِ الساخنةِ تقاوِمُ بنجاحٍ، في النجمِ المُنْتِجِ للطاقةِ، الشَّدَّ الجاذبيَّ نحوَ الداخلِ. وحالما يتوقفُ إنتاجُ الطاقةِ، تُصبحُ هذهِ الضغوطُ غيرَ كافيةٍ للمحافظةِ علىٰ قلبِ النجمِ ضدَ التقلّصِ الجاذبيّ. وهكذا فإنَّ قلبَ النجمِ يتقلصُ.

وعلىٰ العموم، فإذا ما تقلّصتْ كتلةٌ غازيّةٌ ما، فإنها تميلُ إلىٰ التسخينِ. وهكذا، فإنَّ درجةَ حرارةِ مركزِ النجم ترتفعُ مع تقلص النجم. وعندما تقتربُ درجةُ الحرارةِ مِن المائةِ مليونِ ينطلقُ تفاعلٌ اندماجيٌّ جديدٌ داخلَ النجم، وهو تفاعلٌ سوف يولِّدُ الآنَ



الشكل ٢,٣٥ : عندما ينتهي النجمُ مِن دمجِ كلِّ ما لديهِ مِن الهايدروجين الذي يمكنُ دمجُه، يصبحُ لديهِ قلبٌ مِن الهيليوم، وغلافٌ خارجيٌّ يتألفُ أساساً مِن الهايدروجينِ، في درجةِ حرارةٍ أقلَّ.

الطاقةَ للنجم. وما عَساهُ ذلكَ التفاعلُ أنْ يكونَ؟ وهل إنَّ بوسعهِ أن يبنيَ نَوَىً ذرية أكبرَ حتىٰ مِن وحداتِ بناءِ الهايدروجينِ والهيليوم؟

نظرةٌ تاريخية

ظلَّ العديدُ مِن علماءِ الفيزياءِ يتصارعونَ في خمسيناتِ القرنِ العشرين، مع هذهِ المعضلة. ولقد أوحتْ دراساتُ البِنيةِ الذريةِ، ولأولِ وهلةٍ، بإمكانيةِ أن تستمرَّ عمليةُ الاندماجِ النوويِّ، مِن حيثُ الأساسِ، نحوَ بناءِ نَوَى، أكبر. ويمكنُ تخيُّلُ مدىٰ صعوبةِ ذلك في المثالِ الآتي.

افرضْ أنكَ تُقيمُ جداراً حاجزاً، بوضعِ طبقاتٍ مِن الحجارةِ إحداها فوقَ الأخرىٰ. ولكنَّ الجدارَ يصيرُ، بعدَ وصولهِ إلىٰ ارتفاعٍ معيَّنٍ، غيرَ مستقِرٍّ، وتَنهارُ طبقاتُه كُلُّها. فكيفَ يمكنُكَ أن تُواصلَ العملَ إذاً؟

كانت مُعضلةُ دمجِ النَّوَىٰ تتمثلُ في أنَّ خطوتَكَ التاليةَ، بعدَ صنعِ نَوَىٰ الهيليوم، تتضمنُ جَمْعَ نواتيْنِ مِن الهيليوم معاً، أو جمعاً لنواةِ كلٍّ مِن الهيليوم والهايدروجين. وسوفَ تُكَوِّنُ المجموعةُ المؤتلفةُ، في أيٍّ مِن الحالتيْنِ، نواةً غيرَ مُستقرَّةٍ تتجزّأُ إلىٰ أجزاءٍ أصغر.

تمَّ حَلُّ هذهِ المعضلةِ، وبشكلٍ جريءٍ، علىٰ يدِ عالِمِ الفيزياءِ الفلكية فريد هُويْل Fred Hoyle، مِن كامبريدج (الشكل ٢,٣٦). وجادَلَ هويْلُ بالقولِ بأننا بدلاً مِن أن نبحثَ عن اندماجٍ لنواتيْنِ، فلماذا لا يكونُ لدينا اندماجٌ لثلاثٍ منها؟ (وفي مِثالِ الجدارِ الحجريِّ، فإنَّ وَضعَ حجارةٍ فوقَ الأخرىٰ قد لا يُعطي تركيبةً مستقرّةً، ولكنَّ رَصْفَ ثلاثةِ أحجارٍ معاً قد يكونُ حلاًّ ناجعاً). واقترحَ هويْل أنّ ثلاثَ نَوىً للهيليوم قد تندمجُ لتكوينِ نواةٍ مستقرةٍ مِن الكاربون.

وفي واقعِ الحالِ، فلقد خَطَرَ هذا الاحتمالُ في بالِ الآخرينَ مِن قَبْلُ، ولكنَّ صعوباتٍ لا قِبَلَ لهم بها واجَهَتْهُم. ولنتذكرْ بأنَّ اندماجاً لثلاثِ نَوىً مِن الهيليوم يمكنُ أن يَحدُثَ، شريطةَ أن تَصِلَ الثلاثُ كلها المكانَ ذاتَهُ في الوقتِ ذاتِه. ولمَّا كانت هذهِ تتحركُ في اتجاهاتٍ كيفما اتّفق، فإنَّ فرصةَ حدوثِ ذلك لَهِيَ فرصةٌ ضئيلة. وهكذا فإنَّ عمليةً مبنيةً علىٰ مِثْلِ هذِهِ الأحداثِ النادرةِ لسوفَ تسيرُ ببطءٍ شديد، ما لَم توجَدْ وسيلةٌ ما للتعويضِ عن بُطئِها.

وهاهُنا وَجَدَ هويْلُ الحلَّ. فلقد اقترحَ، للتعويضِ عن نُدرةِ حدوثِ اصطدامِ



الشكل ٢,٣٦: ب ٢ف هـ (B² F H)، والمقصودُ بهم: مارغريت بيربدج، وجيوفري بيربدج، وويلم فاولر مع فريد هويل.

لجسيماتٍ ثلاثةٍ مِن هذا القبيل، أن تتضمَّن عمليةُ الدمجِ **تفاعلاً رَنّاناً resonant reaction**. فما هو التفاعلُ الرّنان؟ إنّ الرنينَ resonance، في الصوت، معروفٌ لنا. وعندما يُدَوْزِنُ tunes عازفُ الكمانِ أوتارَ آلتِه الموسيقيةِ، بضبطِ شَدِّها، فإنها تَرِنُّ لبعضِ النغماتِ الموسيقية، أي أنّ ترددات ذبذباتِ الأوتارِ تُوافقُ ذبذباتِ الهواءِ في تجويفِ الآلة، فتكونُ النتيجةُ تضخيمَ هذهِ النغمات. ويُعْرَفُ هذا التوافقُ التامُّ بالرنين. وإنَّ الأمرَ لَيَتَخَطّىٰ مِثالَ الصوتِ المذكورِ بالطبع، حتّىٰ إنَّه لَيَشْمَلُ ظواهرَ أخرىٰ يَحدُثُ فِيها توافقٌ في التردّد.

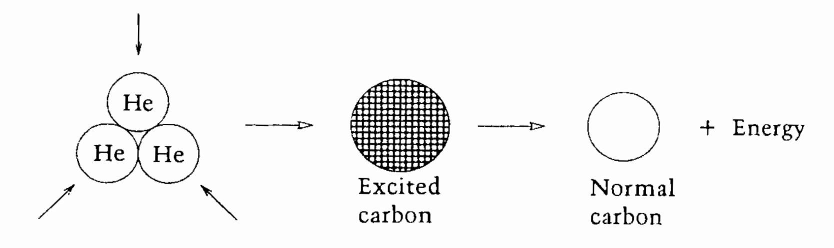
ويتوجّبُ، في التفاعلِ النوويِّ الرنّانِ resonant nuclear reaction، أن تتماثلَ طاقةُ النَوىٰ الثلاث المشارِكةُ مع طاقةِ نَوىٰ الكاربونِ الجديدةِ المتكونةِ، تماماً. ويكونُ حدوثُ التفاعلِ، في هذهِ الحال، محتملاً جداً (مثلما يتمُّ تكبيرُ نغماتِ الكمانِ بالضبط). وهذهِ الاحتماليةُ العاليةُ تعوِّضُ عن نُدرةِ حدوثِ التقاءٍ لثلاثةِ أجسام. ولقد قال هويْل إنَّه ما لَم يوجدْ مِثلُ هذا الرنينِ، فلن يكونَ ثَمّةَ إنتاجٌ في النجمِ ذو شأنٍ للكاربون. وبعبارةٍ أخرىٰ، فحتىٰ يكونَ النجمُ مصدراً للطاقةِ المستمرّةِ، مِن خلالِ الاندماجِ النوويّ، **فإنّ مِن الضروريِّ وجودُ حالةِ رنينٍ كهذه.**

وعندما قامَ هويْل بزيارةٍ لمؤسسةِ كاليفورنيا التقنية، عامَ ١٩٥٤، متسلّحاً بهذا البرهانِ، طلبَ مِن علماءِ الفيزياءِ الذريةِ أن يتحققوا إنْ كانت توجدُ، في نواةِ الكاربونِ، حالةٌ للطاقةِ كهذه. ولقد تنبّأَ أن تكونَ هذهِ الطاقةُ **أعلىٰ** بقليلٍ مِن حالة الطاقةِ لذرةِ الكاربونِ القياسية. ويُقالُ عن نواةٍ كهذهِ، في لغةِ الفيزياءِ النوويةِ، بأنها في **حالةٍ مُثارَةٍ an excited state**. ولكنَّ الحالةَ المُثارةَ لا تدومُ طويلاً، إذ إنّ النواةَ تعودُ إلى حالتها القياسيةِ الاعتياديةِ مِن خلالِ تحريرِ الطاقةِ الزائدة. إنها الطاقةُ ذاتُها التي يَسْتَدِرُّ النجمُ حاجَتَهُ منها حتى يستمرَّ في توهّجِه.

ولقد كانَ فيزياويّو الذرةِ متشكّكينَ إزاءَ هذهِ السلسلة الكاملةِ مِن البراهين (ولا ننسىٰ هنا المواجَهةَ التي حدثتْ، مِنْ قَبْلُ، بين أدنغتن وبينَ علماءِ الفيزياءِ الذرية!). ولكنْ، وعلىٰ الرغمِ مِن كلِّ ذلكَ، فلقد قرَّرَ وارد والنغ، وويلي فاولر، وآخرونَ في مختبرِ كيلوغ للإشعاع، بمؤسسةِ كاليفورنيا للتقنيةِ، أن يتفحّصوا هذا التوقُّعَ الباديَ الغرابةِ مِن عالِم لفيزياءِ النجوم، ولقد وجدوا أنَّ هويْلَ كانَ مُحِقّاً، فالحالةُ المُثارةُ لنواةِ الكاربونِ موجّودةٌ فعلاً، وكما تنبّأَ هويْلُ بالضبط.

ولقد كانَ لِهويْل، وكما سوفَ يتبيّنُ في الفصلِ التالي، دافِعٌ آخَرُ للوصولِ إلىٰ هذا التنبؤِ الرائع، وهو دافعٌ مفروضٌ عليه بأقوىٰ مِن حاجةِ النجم إلىٰ أن يستمرّ في توهجهِ حتىٰ بعد استنفادهِ هايدروجينَه القابلَ للاندماجِ كلَّه. ولكنْ، فلنتابع الآنَ عمليةَ تطوُّرِ النجم.

عندما يصبحُ النجمُ ساخناً بما يكفي، ولْنَقُلْ بدرجةِ حرارةِ مائةِ مليونِ درجةٍ، فإنَّ نوَىٰ الهيليوم التي كانت ترقدُ خاملةً حتىٰ الآن سوف تشاركُ في تفاعلٍ اندماجيٍّ جديد. إنّ مجموعةً مِن ثلاثِ نَوىٰ هيليوم يمكنُ أن تتَّحدَ معاً، لتكوينِ ذرةِ كاربونٍ، في تفاعلٍ



الشكل ٢,٣٧: تلتحمُ ثلاثُ نَوىً للهيليوم معاً، في العملية التي اقترحَها هويْل، لتشكيلِ حالةٍ مُثارةٍ لنواةِ الكاربون (التي تظهرُ علىٰ شكلِ كرةٍ مُظَلَّلَةٍ)، وتتحلَّلُ هذه لتكوينِ نواةِ الكاربونِ القياسية، مع تحريرٍ لبعضِ الطاقة.

رنّان. وتكونُ ذرةُ الكاربون في حالةٍ مُثارةٍ، وتتحللُ إلىٰ الوضعِ الاعتياديّ مُحرِّرةً الطاقةَ (انظر الشكل ٢,٣٧). فلننظرْ كيف يؤثِّرُ ذلكَ كلُّهُ في بِنيةِ الذرةِ كَكلٍّ.

تكوينُ العملاقِ الأحمر

إنَّ تفعيلَ مصدرٍ جديدٍ للطاقةِ يؤدي إلىٰ تجديدِ الضغوطِ داخلَ مركزِ النجم، فيَكُفَّ هذا عن الانكماش. وهكذا لسوفَ يكونُ في إمكانِ هذهِ الضغوطِ أن تتغلّبَ علىٰ الجذبِ إلىٰ الداخلِ والمتولّدِ عن جاذبيةِ مركزِ النجم. ولكنَّ الزيادةَ في الضغطِ لا يمكنُ أن تبقىٰ محدَّدَةً بمركزِ النجم وحدَه. وحتىٰ يتمكّنَ الغلافُ النجميُّ مِن ضبطِ الوضعِ الجديد، فإنهُ يكتسبُ أيضاً ضغوطاً متزايدةً تُفضي إلىٰ توسّعِهِ نحو الخارج. وهكذا فإنَّ الغلافَ الخارجيَّ يتوسعُ تدريجاً، ثم هو يستقرّ في حجمٍ جديدٍ قد يكونُ، وبكلٍّ بساطةٍ، أكبرَ مِن حجمهِ الأصليِّ بمائةِ مرّة. وكذلكَ يزدادُ معدَّلُ الطاقةِ الناتجةِ، أي أنّ النجمَ يصبحُ أكثرَ إضاءةً.

وعلىٰ أيةِ حالٍ، وكما يَسخُنُ مركزُ النجم، بسببِ تقلّصِهِ، فإنّ غلافَهُ الخارجيَّ يبردُ بسببِ توسّعه، إذ قد تنخفضُ درجةُ حرارةِ سطحِهِ الخارجيِّ بضعةَ آلافٍ مِن الدرجاتِ أو أكثرَ. وإذا ما تذكّرْنا مناقشتَنا لتناسُبِ درجةِ حرارةِ سطحِ النجمِ مع لونِه، فإنّ النجمَ الذهبيَّ سوف يتحوَّلُ إلىٰ اللونِ الأحمرِ عند توسّعِهِ.

وهذا هو عملاقُنا الأحمرُ red giant. ولسوفَ تصبحُ شمسُنا كذلكَ عندما تستنفدُ وقودَها الهايدروجينيَّ القابلَ للاندماج، وهنا قد تبلغُ الشمسُ درجةً مِن الكِبَرِ تبتلعُ معها، بالتأكيد، الكواكبَ السيارةَ الداخليةَ كعُطارِدَ Mercury، والزُهْرَةَ Venus، والأرض، كما يُحتَمَلُ جداً أن تبتلعَ المرِّيخَ أيضاً.

وما الذي سوف يحدثُ لِسكّانِ هذا الكوكبِ السّيارِ، أي الأرضِ، عندما تبتلعُهُ الشمسُ[1]؟ فلنأملْ أن يكونوا قد بلغوا درجةً مِن التطورِ يُمكنُ لهم معها أن يغادروا الأرضَ في الوقتِ المناسبِ، وقبل أن تسوءَ الأمور، وهم قد يُفضِّلونَ أن يستقرّوا علىٰ أَحَدِ أقمارِ المشتري أو علىٰ مَقْرُبَةٍ منه. وعلىٰ أيةِ حالٍ فإنَّه لا داعي إلىٰ القلقِ في وقتِنا الحاضرِ، ما دامت هذه الحادثةُ تَبْعُدُ عَنّا ستةَ بلايين عامٍ في المستقبل!

---

(١) انظرْ كتاب «القيامةُ بين العلمِ والقرآن»، للمترجم، ط٢، دار الحرف العربي، بيروت (١٩٩٩)، للتفصيل في مصير الشمسِ والأرض.

وقد يَروقُنا أن ننظرَ إلىٰ قِصّةِ الأستاذِ الذي كان يشرحُ ذلكَ كلَّهُ لتلميذه، في المقهىٰ، إذ اقتربَ منهما شخص كان يجلسُ علىٰ مقربةٍ منهما، مترنحاً، ومتسائلاً بوجهٍ مُتعكّرٍ بالهمِّ: «أستاذ! هل سمعتُكَ تقولُ إنَّ الشمسَ سوف تبتلعُ الأرضَ في ستةِ ملايينِ عام؟»، فأجابه الأستاذُ قائلاً: «كلاّ يا سيدي، لم أقُلْ ستةَ ملايين عام، ولكنْ ستةَ بلايين». وتنهَّدَ الرَّجُلُ المُترنِّحُ حينئذٍ، قائلاً: «ليسَ بِي مِن حاجةٍ إلىٰ القلقِ إذاً»[1].

مِنَ العمالقةِ إلىٰ الأقزامِ

وهكذا فإنَّ لدينا نظريةً تفسِّرُ النجمَ العملاقَ باعتبارِهِ مرحلةً تاليةً في نشوءِ النجمِ وتطوّرِهِ بعد أن استنفدَ وَقودَهُ الهايدروجينيَّ. ويصبحُ النجمُ حينَها أكبرَ حجماً، وأبردَ في سطحِهِ الخارجيِّ، ولكنه أكثرُ إضاءةً مِن قبل، أي أنَّه يسيرُ في مخطَّطِ هـ ـ ر، مبتعداً عن التتابعِ الرئيسيّ main sequence، نحوَ اليمينِ وإلىٰ أعلىٰ، حيثُ توجدُ النجومُ العملاقة. والسؤالُ التالي هو: كيف تتكوّنُ النجومُ الأقزام؟

سوف نُناقشُ سيناريو نشوءِ النجمِ وتطورِهِ، بعد مرحلةِ العملاقِ الأحمرِ، في الفصلِ التالي. لكنّنا يُمكنُنا أن ننظرَ إلىٰ النجومِ الأقزام باعتبارِها إحدىٰ النهاياتِ الممكنةِ لهذا السيناريو. إنها تظهرُ عندما لا تتبقىٰ لدىٰ النجمِ أيّةُ كميةٍ إضافيةٍ مِن الوَقودِ النووي **ومِن أيِّ نوعٍ كان**. وإنَّ مِن المنطقيِّ أن نسألَ عمّا سوف يحدثُ للنجمِ في ذلك الطورِ مِن حياته.

وكما قد نتوقّعُ، فلن تكونَ هناك مقاومةٌ ذاتُ بالٍ للتقلصِ الجاذبيِّ الذي يصيبُ النجم، إذ سوف تبدأُ قِوىٰ الضغطِ، في غيابِ أيِّ توليدٍ للطاقة، بالتناقصِ إلىٰ أقلّ مِمّا يحتاج إليه النجمُ لتحَمُّلِ قوةِ الجاذبية. ولكن، هل سوف يُسْمَحُ للجاذبيةِ بأن تسودَ الموقفَ في كلِّ حالة؟

والجواب هو «كلا». إذ تَخَيَّلْ أنَّ المادةَ، في حجمٍ ما، قد تمَّ ضغطُها بصورةٍ غيرِ

---

(١) أوَحَسِبَ الإنسانُ أنّه قادرٌ علىٰ أن يُقَدِّرَ أجَلَ الشمسِ، وغيرِ الشمسِ، مِمّا في هذا الكونِ، وهو لا يقدِرُ علىٰ التنبؤِ بأصغرِ زلزالٍ في الأرضِ التي هو يعيشُ عليها، ورغمَ كلِّ ما طرأ علىٰ قدراتِهِ مِن تقدُّمٍ كبير، ورغمَ ما عندَه مِن أدواتِ الرصدِ والبحث؟ فما بالك بالشمسِ، ذلك الجِرم البعيد، الذي لا يمكنُ أن تتوجّهَ إليه عينٌ ولا أنْ يقتربَ منه بشرٌ أو ما صَنَعَهُ مِن أجهزة؟ إنَّ أجَلَ الشمسِ، والكونِ كلّهُ، لا يعرفُهُ إلاّ خالِقُ كلِّ شيءٍ سبحانه ﴿وما أمرنا إلاّ واحدة كلمح بالبصر﴾ [القمر: ٥٠]. وأن يصيرَ في مُكْنَةِ الإنسانِ أن ينتقلَ إلىٰ كوكبٍ آخر ثم ينفعُهُ ذلكَ الانتقالُ لَهُوَ وهمٌ آخر. د.س

محدودة. لَسَوْفَ تزدادُ كثافتُها، وسوف يجيءُ الوقتُ الذي تصيرُ فيهِ ذرّاتُها كلّها متراصَّةً ومضغوطةً جداً، ولسوفَ يتدخّلُ تحديدٌ جديدٌ، ذو طبيعةٍ ميكانيكيةٍ كميّةٍ (مِنَ الكَمّ quantum)، في هذهِ المرحلة. ويصبحُ هذا التحديدُ مُناسِباً لِنظامٍ مُحْتَوٍ علىٰ جُسيماتٍ عديدةٍ متماثلةٍ مِن المادةِ مِن النوعِ الفَرْميوني matter of the fermion type (الفَرْميونات fermions هي جسيماتٌ متماثلةٌ تلفُّ حولَ نفسِها كالتالي: ١/٢، ٢/٢، ٣/٢، . . . والأمثلةُ الرئيسيةُ لها هي الإلكتروناتُ والنيوترونات)، وفي حالةِ النجمِ الأبيضِ القزم، فإنَّ هذه الجسيماتِ هي الإلكتروناتُ.

نحن نتذكّرُ بأنّ ذراتِ النجومِ توجدُ، في العادةِ، علىٰ شكلِ بلازما plasma، وأنّ الأيوناتِ ذاتِ الشِّحنةِ الموجبةِ معزولةٌ عن الإلكتروناتِ ذاتِ الشِّحنةِ السالبة. وحالةُ أيِّ إلكترونٍ نموذجيٍّ تحدّدُها طاقتُه، وزخمُهُ momentum، ولَفُّهُ حولَ نفسِه spin. والقاعدةُ الميكانيكيةُ الجديدة للكمِّ التي تصبحُ عاملةً هنا هي أننا لا يمكنُ أن نَجدَ مِثْلَ هذيْنِ الإلكترونَيْنِ في الحالةِ ذاتِها، وبالزخمِ واتّجاهِ اللّفِ والطاقةِ ذاتِها تماماً. ولمّا كان عددُ الحالاتِ المتوفرةِ للإلكتروناتِ، في أيةِ طاقةٍ مُعيَّنَةٍ، محدوداً، لأنَّ درجاتِ سُلَّم الطاقةِ تصيرُ متباعدةً أكثرَ وأكثرَ مع تقلّصِ النجم، فلسوف تقاوِمُ الإلكتروناتُ، في المادةِ عاليةِ الكثافةِ، تقارُبَها الوثيقَ إلىٰ ما هو أكثرُ مِن حدٍّ مسموح. ويُقالُ عن الإلكتروناتِ التي تَصِلُ مِثْلَ هذا الحدِّ بأنها أصبحتْ **مُنحلّةً degenerate**.

وتُعْرَفُ هذهِ القاعدةُ بمبدإِ الاستبعادِ، لِپولي Pauli's exclusion principle، نِسبةً إلى عالِمِ فيزياء الكمّاتِ وولفغانغ پولي W. Pauli، وهو ما يؤدّي إلىٰ تراكمِ ضُغوطٍ جديدةٍ تُعرَفُ **بالضُغوطِ الانحلالية** degeneracy pressures. إنَّ هذهِ الضغوطَ هي التي توقفُ أيَّ تقلّصٍ إضافيٍّ في النجم.

حَدُّ شاندراسيكار The Chandrasekhar limit

استخدمَ رالف هُوارد فاولر R.H. Fowler، في أواسطِ عشريناتِ القرنِ العشرين، وهو فيزياويٌّ مِن كامبريدج، هذهِ النتيجةَ لإيجادِ حالاتِ توازنٍ لِنجومٍ شديدةِ الكثافةِ لم تَعُدْ تملكُ وَقوداً نووياً متبقّياً للاحتراق. وفي مثلِ هذهِ النجوم، فإنَّ الضغطَ الانحلاليَّ يكبحُ النزعةَ الجاذبيةَ لتقلصِ النجم. ولقد وجدَ فاولر أنَّ مِن الممكنِ إسنادَ نجومٍ مِن أيّةِ كتلةٍ كانت، وإبقاءَها في حالاتِ اتّزان. ولسوف تشعُّ مِثلُ هذهِ النجوم بإشعاعاتٍ خافتةٍ جداً مسحوبةٍ مِن مخزونِها التجاذبيّ، وكما نَجِدُ في فَرْضيةِ كالڤن هيلمهولتز التي أشَرْنا



الشكل ٢,٣٨ : س. شاندراسيكار.

إليها سابقاً في موضوعِ الشمس. وذلك يعني أنّ النجومَ سوف تتقلصُ، ولكنْ ببطءٍ شديد، ولسوف تستخدمُ طاقةَ الجاذبيةِ المتحرّرةَ في العمليةِ حتىٰ تشعَّ ضوءَها الخافت. وسوف تكوِّنُ هذه الأقزامَ البيضاء.

وهكذا فلقد ظنَّ العلماءُ بأنَّ معضلةَ القزمِ الأبيضِ قد حُلَّتْ. ولكنْ كلاّ! فلقد كان هناك المزيدُ مِمّا هو آتٍ.

ابتدأ سوبرامانيام شاندراسيكار، وهو شابٌّ هنديٌّ مِن مَدراس، بالتفكيرِ، عامَ ١٩٣٠، في هذهِ المعضلةِ، وهو علىٰ متنِ باخرةٍ تُقِلُّهُ إلىٰ إنكلترا حيثُ كان متوجهاً لِنَيْلِ شهادةٍ في البحث، فوجدَ ثغرةً في برهانِ فاولر. ويمكنُنا أن ندركَ هذه المعضلةَ بالمِثالِ الموضَّحِ في الشكل ٢,٣٩.

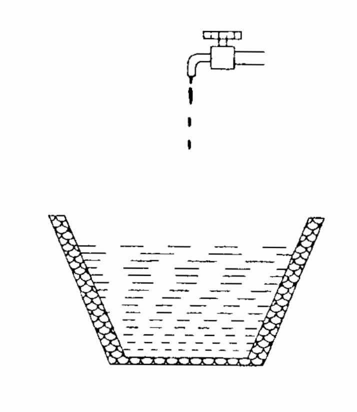
ونرىٰ هنا دَلْواً يُملأُ بالماء. ولمّا كانَ للدلوِ مقطعٌ عَرَضيٌّ محدود، فإنّ مستواهُ سيأخذُ بالارتفاعِ كلّما أضفْنا إليه مزيداً مِن الماء. وفي حالةِ النجمِ القزمِ الأبيضِ، فإنَّ انضغاطَ المادةِ، مع مَبدإِ پولي، ينبِّئانِنا بأنه لا يمكنُ استيعابُ الإلكتروناتِ إلاّ بعددٍ

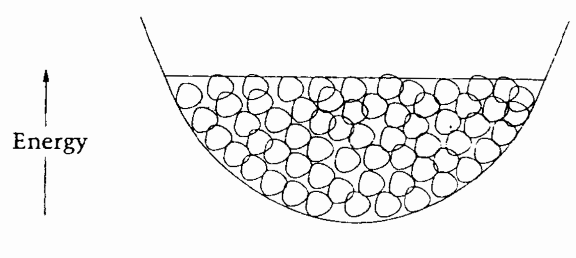
محدودٍ، وفي أيِّ حجمٍ كانَ، وإلىٰ حَدٍّ معيَّنٍ مِن الطاقة. فإذا أُرِيدَ استيعابُ مزيدٍ من الإلكتروناتِ في حجمٍ معيَّنٍ، وكما هو حادِثٌ في حالِ استمرارِ النجمِ علىٰ تقلّصِهِ، فلا بدَّ أن يرتفعَ مستوىٰ طاقةِ الإلكتروناتِ، وكما يحدثُ للماءِ في الدلو. ثُمَّ إنّ الإلكتروناتِ تشرَعُ، عندما تَزيدُ طاقتُها، بالحركةِ بصورةٍ أسرع. ولقد كان بِوسعِ شاندراسيكار أن يتوصلَ إلىٰ أنَّ سُرعاتِ النجوم الأكبرِ حجماً قد تقتربُ مِن سرعةِ الضوء.

ولقد أظهرَ ألبرت آينشتاين Albert Einstein، في عام ١٩٠٥، أنّ الأفكار الغامضةَ عن قياسِ المكانِ والزمانِ تحتاجُ إلىٰ المراجعةِ، للمحافظةِ علىٰ انسجامِها مع الظواهرِ الملاحَظةِ في الكهربائيةِ والمغناطيسية. ويتوجبُ، نتيجةً لذلكَ، أيضاً تخليصُ قوانينِ الحركةِ مِن الشكليةِ التي أضفاها عليها نيوتن في القرنِ السابع عشر. وصارت القوانينُ الجديدةُ تُعْرَفُ بنظرية النسبية الخاصة the special theory of relativity (انظرْ الفصلَ الخامسَ لتفاصيلِ هذه النظرية). وصارت تعديلاتُ قوانينِ الحركةِ النيوتنيةِ ذات مغزىً بالنسبةِ إلى الأجسام المتحركةِ بسرعاتٍ تقتربُ مِن سرعةِ الضوء. ولذا فقد قالَ شاندراسيكار إننا يجبُ أن نستخدمَ نظريةَ النسبيةِ الخاصةِ في حالةِ النجومِ الضخمةِ، وليسَ قوانينَ الحركةِ لنيوتن.

قام شاندراسيكار بالبحثِ في هذه المعضلةِ، وسرعانَ ما وجدَ بأنّ اعتمادَ الضغطِ الانحلاليِّ علىٰ كثافةِ المادةِ يتغيّرُ في النظامِ النسبيّ، فالنجومُ الأصغرُ هي أَلْيَن. وهكذا فلقد توجَّبَ تعديلُ نتيجةِ فاولر الأولىٰ، المؤسَّسةِ علىٰ الأفكارِ النيوتنية. ولقد وجدَ شاندراسيكار، علىٰ وجهِ الخصوص، بأنَّ ثَمَّة حدّاً لكتلةِ النجم، لا يمكنُ فوقَهُ إسنادُهُ بإحداثِ ضغوطاتٍ انحلالية. ويبلغُ حَدُّ الكتلةِ هذا ١,٤ مِن كتلةِ الشمس. **ويعني ذلك أنَّ النجومَ التي تمتلكُ كتلاً أكبرَ بـ ٤٠٪ مِن الكتلةِ الشمسية لا يمكنها أن توجدَ علىٰ شكلِ أقزامٍ بيضاء.**

ولقد كانت هذهِ النتيجةُ مثيرةً فعلاً، وهي بيَّنَتْ، وبصورةٍ مدهشة، كيف أنَّ قواعدَ العالَمِ الصغيرِ microworld يمكنُ أن تحدِّدَ صفاتِ أجسامٍ عظيمةٍ كالنجوم. ولكنْ عندما قامَ شاندراسيكار بعرضِ النتائج التي توصّلَ إليها علىٰ الحشدِ المَهيب لفلكيّي الجمعيةِ الفلكيةِ الملكية، في الاجتماعِ التقليديِّ للجُمعةِ الثانيةِ مِن كلِّ شهرٍ، في كانون الثاني مِن عام ١٩٣٥، فلقد استُقْبِلَ بطَريقةٍ غيرِ ودية، ولم يكنْ ذلك متوقعاً، ومِن أدنغتن نفسِه ليسَ غَيْرُ.





الشكل ٢,٣٩: نرىٰ، في الشكلِ العلويّ، كيف يرتفعُ مستوىٰ الماءِ في الدلوِ، عندما نسكبُ فيه المزيدَ مِن الماء. وكذلكَ فإنَّ التقلصَ، في النجمِ الكثيف، يَزيدُ مِن كثافةِ الإلكترونات، وهو ما يؤدي بها إلىٰ أن تشغلَ مستوياتٍ أعلىٰ وأعلىٰ مِن الطاقة، بينما هي تملأُ كلَّ المكانِ المتوفرِ ولكن المحدود.

وكان أثَرُ الكتلةِ الحرجةِ البالغ هذا، في النجومِ الأقزامِ البيضاءِ، هو ما أزعجَ أدنغتن في نتيجةِ شاندراسيكار. وبينما يمكنُنا أن نستريحَ مطمئنينَ إلىٰ أنَّ النجومَ دونَ هذا الحدِّ يمكنُها أن تستمرَّ في وجودها باعتبارها أقزاماً بيضاء، فما الذي يمكنُ أن يحدثَ لتلك النجومِ التي تقعُ كتلتُها **فوقَ** هذا الحدّ؟ وما هو مصيرُ مثلُ هذا النجمِ إذا لم تكنْ لديه ضغوطٌ انحلاليةٌ في داخله؟ إنَّ مِثْلَ هذا النجم سوف يستمرُّ في التقلصِ وإصدارِ الإشعاعِ، ولكنْ ما عساها أنْ تكونَ نقطةُ النهايةِ لهذهِ العملية؟ قال أدنغتن:

> ... سوف يَظَلُّ النجمُ يشعُّ ويشعّ، ويتقلصُ ويتقلص، حتىٰ يَصِلَ، وكما افْتُرِضَ، إلىٰ قطرٍ مِن كيلومتراتٍ قليلةٍ، حيثُ تصبحُ الجاذبيةُ فيهِ حينئذٍ قويةً بما يكفي لمنعِ الإشعاعِ مِن الانبعاثِ، فيتمكنُ النجمُ عندئذٍ مِن أن يجد السلامَ أخيراً... وقد تتدخلُ أحداثٌ مختلفةٌ لإنقاذِ النجم، ولكنني أريدُ حمايةً أكبرَ مِن ذلك. إنني أعتقدُ أنّه يجبُ أن يكونَ ثمةَ قانونٌ للطبيعةِ يحولُ دونَ أن يتصرّفَ النجمُ بهذه الطريقة المضحكة.

وهكذا فلقد أحسَّ أدنغتن بأنّ الحُجَجَ التي ساقَها شاندراسيكار، للوصولِ إلىٰ مثلِ هذا الاستنتاج «المضحك»، لا بدَّ أن تكونَ مغلوطةً. ولقد ذهبَتْ هيبةُ سلطانِهِ وشخصيتِه، الباعثيْنِ علىٰ الاحترامِ والثقةِ، بعيداً في تكوين الانطباعِ لدىٰ اجتماعِ الجمعيةِ الفلكيةِ الملكية بصوابِ رأيه.

وعلىٰ الرغم مِن ذلك، فلقد أُثْبِتَ أخيراً بأن شاندراسيكار كان علىٰ صواب، وصارَ الحَدُّ علىٰ كتلةِ القزمِ الأبيض الذي استنتجه يُعْرَفُ **بِحَدِّ شاندراسيكار Chandrasekhar limit**. وصارَ يتوجَبُ أن تكونَ كتلةُ الأقزامِ البيضاءِ **دونَ** هذا الحدّ. ولا تزالُ الملاحظاتُ، حتىٰ الآنَ، تؤيدُ هذهِ النتيجة.

ولكنْ ماذا عن تلك النجوم غيرِ المحظوظةِ التي تتجاوزُ كتلُها ذلك الحدَّ الأعلىٰ؟ لقد كان أدنغتن، ويا لَلسُخْرِيَّةِ، مُصيباً في هاجسِهِ بالشَّرِّ بالنسبةِ إلىٰ مستقبلِ هذه النجوم، ولكنَّ توقعاتِهِ عمّا يتوجبُ علىٰ الطبيعةِ فِعلُهُ لم تتأيدْ، ذلكَ لأنَّ الطبيعةَ[1] قد اعتادت علىٰ تجاوزِها للتوقعاتِ الإنسانيةِ، وبما يؤدي إلىٰ نتائجَ أكثرَ إثارةً ممَّا قد يتخيّلُهُ عقلُ بشر.

ولو كان أدنغتن قد أخذَ نتائجَ شاندراسيكار مأخذَ الجِدِّ لكانَ حازَ علىٰ شرفِ التنبؤِ بوجود **الثقوبِ السوداء black holes**. وهناك المزيدُ عن هذهِ القصّةِ في الفصلِ السادس.

---

(١) لا يصِحُّ أن نتكلَّمَ علىٰ الطبيعةِ وكأنها عاقلةٌ فاهمة! لا بل وكأنَّها الخالقةُ المُبدعة! فتعالىٰ الخالِقُ سبحانَهُ، خالِقُ كلِّ شيءٍ ومليكُهُ، علىٰ ذلكَ عُلُوّاً كبيراً. فليستِ الطبيعةُ عقلاً مُفكِّراً! ولا المادّةُ خالقةُ نفسِها، أي موجِدَتُها مِنَ العَدَم! فذلك كلُّهُ مُحالٌ، فصارَ لا بُدَّ مِن أن نُكرِّرَ فنقولَ بأنَّ مَن خَلَقَ الطبيعةَ وسُنَنَها وقوانينَها التي تنتظمُها جميعاً إنَّما هو الخالقُ سبحانَه.

أأُغرودةٌ مِنْ غيرِ ما بُلبلٍ؟   أأُنشودَةٌ مِن غيرِ ما مُنشِدٍ؟
أأُصدوحَةٌ مِن غيرِ عندَليبٍ؟   أمَوْجودٌ مِن غيرِ ما مُوجِدٍ؟

ولقد عَرَفَ رَبَّهُ بذلكَ قُسُّ بْنُ ساعِدَةَ الأيادِيُّ، حينما أنشدَ:
البَعْرَةُ تَدُلُّ علىٰ البَعير..
والأقدامُ تَدُلُّ علىٰ المَسير..
أرضٌ ذاتُ فِجاج..
وسماءٌ ذاتُ أبراج..
ألا تَدُلُّ علىٰ العَلِيِّ القدير؟ د.س

الأعجوبة (٣)

عندما تنفجرُ النجومُ...

حَدَثٌ يَمتَدُّ قُروناً

ما هو القاسِمُ المشترَكُ بين ما يأتي: بين أمبراطورٍ صينيٍّ مِن سُلالةِ سانْغَ الحاكمة، وطبيبٍ عارفٍ مِن الشرقِ الأوسط، وقبائلِ الهنودِ الحُمْرِ في شِبهِ القارّةِ الأمريكية، وكلُّهم ينتمي إلىٰ القرنِ الحادي عشر، وبين فلكييّ القرنِ العشرين؟

هل يبدو هذا السؤالُ أشْبَهَ بمُزحةٍ عملية؟ إنه قد يكونُ كذلكَ فعلاً!

والجوابُ المُلْغَزُ هو أنهم كانوا شهوداً علىٰ حَدَثٍ كونيٍّ مذهلٍ لا يزالُ يتكشّفُ لنا. إنَّهُ حَدَثٌ شُهِدَ علىٰ الأرضِ، أوَّلَ مرّةٍ، في الرابعِ مِن تموز عامَ ١٠٥٤ للميلاد، ولكنّنا لا نزالُ ندرسُ آثارهُ الكارثيةَ حتىٰ اليوم، ولسوف يستمرُّ الفلكيون في بحوثهم عنه لسنينَ قادمة.

وهذا الحَدَثُ، وأمثالٌ له مِن حوادثَ أخرىٰ، لَهُوَ جديرٌ بأن يُدرَجَ ضمنَ سِجِلّنا لأعاجيبِ الكون.

فلنبدأ بذلك الصينيِّ الذي ندينُ له بالإبقاءِ علىٰ مُدَوَّناتٍ تعودُ إلىٰ تسعةِ قرونٍ مَضَتْ ونصفِ القرن.

النجمُ الضيف

في مُدَوَّنَةِ تاريخِ سلالةِ سانْغ الحاكمةِ لِهو بنغ يوك، تمّ وصفُ الحَدَثِ التالي:

في يوم چي ـ چو، وفي الشهرِ الخامسِ مِن عَهْدِ چي هُو، ظهرَ «نجمٌ ضيفٌ»، في الجنوبِ الشرقيِّ مِن ثين ـ كون، وبعَرْضِ عدّةِ سنتمتراتٍ. ثم إنه خَبا بعَدَ مرور أكثر مِن عام.

ما عسىٰ ذلكَ الحَدَثُ أن يكون؟ وكيف أمكنَتْ مُشاهَدتُه؟ وماذا أُريدَ بالقولِ بأنه نجمٌ ضيف؟

حتىٰ نحصلَ علىٰ أجوبةٍ لأسئلتنا، لا بدَّ مِن أن نعودَ القهقرىٰ ألفاً مِن السنين، إلىٰ التقليدِ الصينيِّ الذي كانَ سائداً آنَئِذٍ، حيثُ كان الأمبراطورُ الحاكمُ ينظرُ في السماءِ، باحثاً عن أيَّةِ «نُذُرٍ» مِنَ اللّهِ القادرِ، فيما لو حدثَ أنَّه قد مالَ عن جادَّةِ الاستقامةِ والعدلِ الضيّقة. وحتىٰ لا يُضْطَرَّ الأمبراطورُ إلىٰ أن يدفعَ ثمناً غالياً بسببِ إخفاقهِ غيرِ المُتَعَمَّدِ في إدراكِ هذا النذير، فلقد كان يتوجّبُ عليه أن يتحقّقَ مِن مُراقَبةِ السماءِ اليَقِظَة. وكان مِن واجباتِ مُنَجِّم astrologer القصرِ أن يُحافظَ علىٰ اليقظةِ والانتباهِ، وأن يُعْلِمَ الأمبراطورَ عن أيِّ شيءٍ غيرِ اعتياديّ. ولقد تمَّتْ مُلاحظةُ وتسجيل ذلك الحَدَثِ الهامِّ، وعلىٰ ذلك النحوِ الوافي الذي أشَرْنا إليه، في ذلك السِّياق. إنّ الرابعَ مِن تموز، مِن عام ١٠٥٤، هو التاريخُ الذي يوافقُ المُدَوَّنَةَ الصينيةَ، في تقويمنا الحديث. ويُشيرُ تعبيرُ «النجم الضيفِ» إلىٰ أنَّ النجمَ لم يكنْ موجوداً في السماءِ مِن قَبْلِ ذلك الحدث، وبالأصحِّ لم يكنْ مُشاهداً مِن قَبْلُ. وبالمِثْلِ، وبعدَ انتهاءِ ذلك الحدثِ، فلقد اختفىٰ ذلك النجمُ مِن السماء. وكان مِن عادةِ الصينيينَ أن يَصِفُوا مِثْلَ تلك الأشياء العابرة باعتبارها ضيوفاً في السماء. وتمَّ تسجيلُ رؤيةِ هذا الشيءِ في اليابانِ أيضاً، إذ كان المنجّمونَ يحتفظونَ كذلكَ بسجلاّتٍ شديدةِ التدقيقِ عن السماء.

ولقد صارَ ذلك النجمُ الذي رُبَّما كانَ أبهتَ مِن أن تُمْكِنَ رؤيتُه مِن قَبْلُ، متوهِّجاً جداً، وإلىٰ درجةٍ أمكنَ معها مشاهدتُه حتىٰ في ضوءِ النهار، بينما كان عندَ حُلولِ الليلِ أقوىٰ توهّجاً بخَمْسِ مرّاتٍ مِن الكوكبِ السَّيار، الزُّهْرَة، في مُقتبَلِ النهارِ أو في أواخرِ المساء، لا بَلْ كانَ في إمكانِ المَرْءِ، عندما صارَ توهّجُهُ أعظمَ شيءٍ، أن يَقْرَأَ علىٰ ضوئِه ليلاً.

ولكنَّ النجمَ الضيفَ لم يُحافظْ علىٰ توهّجِهِ الأول، وصار ضوؤه يخبو. ويمكنُنا أن نستدِلَّ اليومَ، وبمساعَدةِ المُدوَّناتِ القديمةِ مَرَّةً أخرىٰ، علىٰ أنَّ ذلكَ الشيءَ كان مَرْئيّاً في ضوءِ النهارِ لحوالىٰ ثلاثةٍ وعشرينَ يوماً، وفي الليلِ لنحوٍ مِن ستّةِ أشهُر. ثُمَّ إنهُ لم يَعُدْ في نهايةِ المطافِ، وبعد عامَيْنِ، مرئيّاً. ويَدُلُّ الاتجاه المُدَوَّنُ الذي شوهِدَ فيه علىٰ أنه

كان يقعُ في بُرْجِ الثور Zeta Tauri in the constellation of the Bull[1]. ولكنْ، ما الذي نراهُ اليومَ هناك؟

يُرينا الشكلُ ٣,١ صورةَ ذلك الموقع، حيث إننا لا نرىٰ بالعينِ المجردّةِ أيَّ شيءٍ فيه. وتُرينا الصورةُ تركيبةً مُثيرةً أشبهَ بالغيمةِ، مع خُيَيْطاتٍ تبرزُ منها. ولقد ذَكَّرَ شكلُها الفلكيينَ بحيَوانِ السَّرطان، ولذا فقد أطلقوا عليها اسمَ سديم السَّرطان Crab Nebula. ومهما يكُنْ مِن أمرٍ يحدثُ الآنَ ثَمَّةَ، واستناداً إلىٰ مظهرِهِ المضطربِ جداً، فإنه لا بدَّ أن يكونَ شيئاً عنيفاً للغاية.

ولسوف نعودُ إلىٰ هذه الصورةِ المثيرة مرَّةً أخرىٰ. ولْنَنْظُرْ أولاً إلىٰ دلالةٍ أخرىٰ علىٰ رؤيتها، مِن مكانٍ آخرَ مختلِفٍ جداً مِن العالَم.

رسومٌ علىٰ الصخور

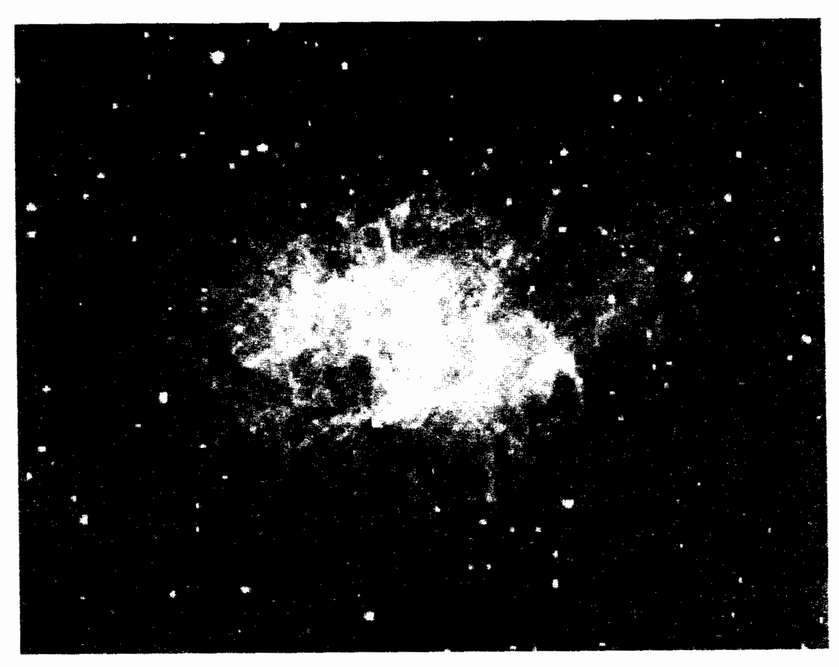
قام ويليم سي .ميلَر، عام ١٩٥٥، بطبع كُتَيِّبٍ برعايةٍ مِن جمعيةِ المحيطِ الهادئ الفلكية، فقدَّمَ الدليلَ علىٰ أنَّ هنودَ پيوبلو، في شمالي أمريكا، قد شهدوا حَدَثَ عام ١٠٥٤، وسجّلوهُ ليس علىٰ الورقِ، وإنما مِن خلالِ رسومٍ علىٰ الصخورِ لا تزالُ ماثلةً للعيانِ حتىٰ اليوم.

ويُرينا الشكلانِ ٣,٢ و٣,٣ نوعيْنِ مختلفيْنِ مِن الصّور، إذ نرىٰ في الشكلِ الأول **كتابةً تصويريةً**، أي بالصُورِ، وهو ما يُعْرَفُ **بالپكتوغراف pictograph**، وهي رُسِمَتْ علىٰ الصخرِ بِدهانٍ أو طباشيرَ (أو بصخرٍ يكتبُ مِثْلَ الطباشير). وقد وُجِدَتْ هذه الرسومُ في مِنطقةِ ناڤاغو كانيان. وأمّا الشكلُ الثاني فإنه يُرينا **نقشاً علىٰ الصخرِ منحوتاً بآلةٍ حادّة petroglyph**، وهو يجيءُ مِن مِنطقةِ وايت ميسا. وبالطبع، فإنَّ الهلالَ، في هذه النقوشِ، هو القمرُ. ولكنْ، ما هو هذا الشيءُ المستديرُ قريباً منه؟ ثم لماذا يتوجهُ الهلالانِ بصورةٍ متعاكسةٍ في الرسميْن؟

يمكنُ للمرءِ أن يتحقّقَ، وبِيُسْرٍ، مِن خلالِ الرسوم الصينيةِ القديمةِ، مِن أنَّ القمرَ كان هلالاً عندما شوهِدَ ذلك الشيءُ أولَ مرّةٍ، وكان أكثَرَ ما يكونُ توهّجاً. ويُعتَقَدُ بأنّ

---

(١) Zeta= الحرف السادس من الأبجدية اليونانية.
Tauri= الثوري. لاحظ أن أصلَ الكلمةِ عربيٌّ. وTaurus هو برجُ الثور.
Constellation= البرج = الكوكبة، أي **مجموعة** مِن النجوم الثابتة، فالكوكبةُ غيْرُ الكوكب، لأنّ الكوكب **واحدٌ** لا جمعٌ. د.س



الشكل ٣,١: يُمَثِّلُ سديمُ السرطانِ البقايا المتناثِرةَ لنجمٍ شوهدَ وهو ينفجر، مِن قِبَلِ الفلكيينَ الصينيين، في عام ١٠٥٤م. ولقد أُعيدَ تَركيبُ هذه الصورةِ مِن قِبَلِ ديڤِد مالِن، عن صورةٍ التقطَها المِرْقابُ هالي Hale Telescope، في ستيناتِ القرن العشرين.

النجمَ الضيفَ كان قريباً مِن القمر بما يكفي لرسمهِما معاً. وفضلاً عن ذلكَ فلقد وُجِدَتْ هذه الصورُ في أمكنةٍ كان يسهلُ رؤيةُ الأفقِ الشرقيِّ منها. وإذا ما أخذْنا بنظرِ الاعتبارِ أنَّ منظراً كهذا لا بدَّ أنَّه كان مرئياً علىٰ مقرُبةٍ من الأفقِ الشرقيّ، فإنّ بإمكاننا أن نعلِّقَ أهميةً علىٰ موقعِ هذه الصور.

هل يمكنُ أن تمثِّلَ هذه الصورُ مشهداً هو أكثرُ حدوثاً، ومعروفٌ للناظرين، وهو خسوفٌ، أو احتجابُ، الزّهرة؟ يعتقدُ ميلر بأنَّ الأمرَ ليس كذلك، لأنَّ هذه الخسوفاتِ تحدثُ مرّةً كُلَّ سنينَ قلائل، وعندها فإنَّ المرءَ ليتوقّعُ أن يجدَ المزيدَ مِن مِثْلِ هذه الرسومِ في تلك المنطقة. وقد يكونُ الأمرُ الأصحُّ أن نستنتجَ بأنّ القبائلَ لم تكنْ تهتمُّ، في العادةِ، بالفَلَكِ، ولكنها تأثرتْ تأثراً طاغياً بذلك الحدثِ البالغِ النُّدرةِ، وإلىٰ الحدِّ الذي جعلَها تخلّدُهُ علىٰ الصخر.



الشكل ٣,٢: كتابةٌ بالصورِ، مِن مِنطقةِ ناڤاغو كانيان، وهي قد تسجِّلُ حَدَثاً فلكياً فريداً رآهِ البيوبلو الهنود، عام ١٠٥٤م.



الشكل ٣,٣: نقشٌ على الحجر، مُسجِّلاً الحدثَ ذاته، كما وُصِفَ في الشكل ٣,٢، وقد وُجِدَ في وايت ميسا.

أمَّا فيما يخصُ اتجاهَ الهلاليْنِ المتعاكسيْنِ، فإنَّ ميلر يعتقدُ بأنَّ الفنانينَ قد يكونونَ رسموا أحدَ الشكلينِ مِن خلالِ النظرِ إلىٰ الشيءِ الأصليِّ مِن فوقِ أكتافهم، وربما التبسَ اليمينُ واليسارُ عليهم، إذ كيف يمكنُكَ أن ترسمَ هلالاً، وظهرُكَ مُواجِهٌ له، وأنت ناظرٌ إليه مِن فوقِ كتفك؟ حاوِلْ ذلك[١].

رؤيةٌ في الشّرقِ الأوسط

في ٢٩ من حزيران، عام ١٩٧٨، وفي رسالةٍ إلىٰ المجلّة المرموقة نيتشر Nature، قدَّمَ كينيث بريكر، مِن مؤسسةِ ماساشوسيتس للتقنية، وألينور وألفريد ليبر، من القدس، برهاناً علىٰ أنَّ المنظرَ المثيرَ ذاتَه كان قد شوهدَ وسُجِّلَ في الشرقِ الأوسطِ، مِن قِبَلِ طبيبٍ مسيحيٍّ مِن بغدادَ، واسمه ابنُ بوتان Ibn Butan. ورغم أنَّه لم يكُنْ فلكياً أو منجِّماً محترفاً، فلقد كان ابنُ بوتانَ، مِثلَ مُعاصريهِ مِن الأطباء، مهتماً باحتمالِ أن تكونَ الأمراضُ علىٰ الأرضِ متعلِّقةً بأحداثٍ كونية. وقد دُوِّنَتْ سيرةُ حياتِه في موسوعةٍ للتراجمِ الذاتية قامَ بها ابنُ أبي أُصَيْبَعَة Ibn Abi Usaybia، حوالىٰ عام ١٢٤٢م، حيثُ قام بتسجيلِ روايته. وتُلقي مُقتطَفاتٌ مترجمةٌ مِن هذا التقريرِ ضوءاً علىٰ هذا الموضوع:

> لقد حَدَثَتْ واحدةٌ مِن الأوبئةِ المعروفةِ في زمانِنا، عندما ظهرَ نجمٌ مشهودٌ في برجِ الجوزاءِ (التوأميْنِ) Gemini، عامَ ٤٤٦ للهجرة. ولقد دُفِنتْ في خريفِ ذلكَ العامَ أربعونَ ألفَ نفسٍ، في كنيسةِ لوقا، بعد أن امتلأتِ المقابرُ في القسطنطينية.. وعندما ظهرَ هذا النجمُ المشهودُ في برجِ الجوزاء.. فلقد تسبَّبَ في حدوثِ وباءٍ تفشّىٰ في الفُسطاطِ، عند انخفاضِ منسوبِ النيل، في زمنِ حدوثِهِ عامَ ٤٤٥هـ.

وتُقابِلُ السنةُ الهجريةُ ٤٤٥ الفترةَ مِن ١٤ نيسان ١٠٥٤م وحتىٰ ١ نيسان ١٠٥٥م، والتي تشملُ التواريخَ التي شاهدَ فيها الصينيونَ النجمَ الضيف. وقد علَّلَ المؤلفونَ التعارضَ مع عام ٤٤٥هـ المتعلِّقِ بوادي النيلِ بخطإٍ في النقلِ مِن قِبَلِ ابنِ أبي أصيبعة. ذلكَ لأنَّ التاريخَ، في مكانٍ آخرَ مِن الموسوعةِ ذاتِها، هو السنةُ ٤٤٦ هجرية فعلاً. ويبدو أنَّ ابن بوتان كان يُشيرُ إلىٰ أنَّ ذلكَ الحَدَثَ قد حدث صيفاً، وسبَّبَ الوباءَ في الخريفِ التالي، عندما انخفضَ منسوبُ النيل. وهذا يُحِلُّ ذلكَ الحَدَثَ في صيف عام

---

(١) كما أننا نرىٰ، في الرسميْنِ، شيئاً آخرَ بارزاً غَفَلَ هؤلاءِ عن ذِكره، وأعني به أنّ الشيءَ المستديرَ يقعُ إلىٰ أسفلِ ويسارِ الهلال، وهو يوحي بأنَّ الرسميْنِ يصوّرانِ الشيءَ ذاته. وهو لا بدَّ أنه كان مثيراً جداً فحفرَ نفسَه في الذاكرة. د.س

١٠٥٤ الميلاديّ، وهو ما يتفقُ مع التاريخِ الصينيِّ الأكثرِ تحديداً، وهو ٤ تموز مِن عامِ ١٠٥٤ الميلاديّ.

وهناكَ نقطةٌ أخرىٰ تستدعي التوضيحَ، فسديمُ السَّرطانِ يقعُ في كوكبةِ الثور، بينما يُشير ابنُ بوتان إلىٰ برجِ الجوزاء. ولكنْ إذا ما أخذْنا بنظرِ الاعتبارِ المبادَرَة precession المُطَّرِدَةَ لمحورِ دورانِ الأرض، فإنَّ سديمَ السرطانِ كان ظهرَ في برجِ الجوزاءِ قبلَ ألفِ سنةٍ تقريباً.

وهكذا يَصيرُ لدينا ثلاثةُ مصادرَ مختلفةٍ للمعلوماتِ حولَ مُشاهَدةِ حَدَثٍ كونيٍّ فريدٍ[1]، مِن الصينِ واليابانِ في شرقيِّ آسيا، ومِن الشرقِ الأوسطِ في غربيِّ آسيا، بالإضافةِ إلىٰ قارّة أمريكا في نصفِ الكرةِ الغربيّ. ولكنْ، لماذا لا توجَدُ مُدَوَّناتٌ مِن الهندِ أو مِن أوروبا؟ لقد كان عِلمُ الفلكِ مزدهراً في الهندِ آنذاك، ولا بدَّ أنَّ مِثلَ ذلك الحدثِ كان قد شوهدَ في مكانٍ ما علىٰ الأقلِّ مِن شبهِ القارةِ الهندية، رغمَ حقيقة أنَّ تموزَ يقعُ في فصلِ الرياحِ الموسمية monsoon. وقد يعودُ ذلك إلىٰ قِلّةِ الأحاديثِ المدونةِ في الهندِ، والتي ترتقي إلىٰ تلك الحِقبةِ التاريخية. وكان التأكيدُ، في الدراساتِ، يَنْصَبُّ آنَذاكَ علىٰ قراءةِ الكتُبِ القديمةِ بأكثر مِن اهتمامهِ في إبداعِ الكُتُبِ الجديدة. وعلىٰ الرغمِ مِن ذلك، فلقد بُذِلَتْ جهودٌ للعثورِ علىٰ مدوناتٍ قديمةٍ ترقىٰ إلىٰ تلك الفترةِ مِمّا قد يحتوي علىٰ مَراجعَ أخرىٰ لذلك الحدث.

وأينَ هي أوروبا مِن كلِّ ذلك؟ ولماذا أخفقَ الأوروبيونَ في تسجيلِ هذا الحدثِ رغمَ تقاليدهم العريقةِ في حِفظِ وكتابةِ المخطوطات؟ يقولُ الفيزياويُّ الفلكيُّ فريد هويْل، والمؤرِّخُ العِلميُّ جورج سارتون، كلٌّ علىٰ حدة، بأنَّ المعتقداتِ الدينيةَ، حينئذٍ، كانت تقولُ بأنّ اللّه تعالىٰ قد خَلَقَ الكونَ أنموذجاً بالغاً حَدَّ الكمال، وهكذا فإنَّ ظواهر جديدةً كالتي نتحدّثُ عليها لن تُعتبَرَ معقولةً أو ممكنةَ التصديقِ بما يكفي لتوثيقها. وهكذا فلرُبما اختارَ علماءُ الأدْيِرَةِ أن يتجاهلوا ما قد رَأوْهُ بأمِّ أعينِهم!

ولكن، فَلْنَعُدْ مجدَّداً إلىٰ الفهمِ الحديثِ لهذا الحدث.

---

(١) وجاء في كتاب «تاريخ الخلفاء»، للسُّيوطيّ، في أحداثِ سنةِ ثمانٍ وخمسينَ وأربعمائة للهجرة، في زمن القائم بأمرِ اللّهِ العباسيّ، ما يلي: «وفيها ظهرَ كوكبٌ كأنهُ دارةُ القمرِ ـ أي هالَتُهُ ـ ليلةَ تمامِهِ بشُعاعٍ عظيم، وهالَ الناسَ ذلكَ وأقامَ عَشْرَ لَيالٍ، ثم تناقَصَ ضوؤُهُ وغاب». أقول: وَلَعَلَّ السيوطيَّ غَلِطَ في التاريخ.
د.س

مُسْتَسْعِرُ السَّرطان الأعظم The Crab supernova

في حوالىٰ عام ١٧٣١، عثرَ طبيبٌ وفلكيٌّ إنكليزيٌّ يُدعىٰ جون بيفِز علىٰ سديم في كوكبةِ الثور Taurus. وفي عامِ ١٧٥٨ ابتدأ تشارلس مِسيير بِنَشْرِ فهرسِهِ الشهيرِ للأشياءِ السديميةِ الساطعةِ في السماء، ومَيَّزَ هذا الشيءَ الساطعَ بالرقم M_1. ويُرينا الشكلُ ٣,١ هذا الشيءَ المنير. وكما قُلنا سابقاً، فلقد اكتسبَ هذا، في أواسطِ القرنِ التاسع عشر، اسمَ سديم السَّرطان Crab Nebula، بسببِ خُيَيْطاتِهِ التي هي أشبهُ بحيوانِ السرطان. وبموقِعِهِ الذي يتوافقُ مع المدوَّناتِ الصينيةِ القديمة، وبيئتِهِ الطبيعيةِ التي تتماشىٰ مع مُخلَّفاتِ ذلك الحدث، فإنَّ الفلكيِّين واثقونَ بأنَّ النجمَ الضيفَ لم يَخْتَفِ في واقعِ الحال، ولكنه لا يزالُ موجوداً علىٰ شكلِ سديم السَّرطان. وهذا السديمُ يبعدُ عنّا ٥٠٠٠ سنةٍ ضوئيةٍ تقريباً، بينما يبلغُ اتِّساعُ البِنيةِ الكُلِّيةِ للشكل ٣,١ ما قد يبلغ مِن ٥ إلىٰ ١٠ سنين ضوئية.

وهكذا فإنّ هذهِ هي بقايا ذلك الحَدَثِ الذي شهدَهُ الصينيونَ قبلَ تسعةِ قرونٍ ونصف القرن، والتي نراها اليوم. وقبلَ أن نُحَلِّلَ الحدثَ ذاتَهُ، فلنبتعدْ قليلاً لنستكشفَ عامِلاً للحيطةِ والحذرِ الذي يتوجّبُ علىٰ الفلكيِّ أن يتحلّىٰ به، عند تفسيرِهِ للصورِ الكونية[١].

صُوَرٌ مُضَلِّلَةٌ

يُرينا الشكلُ ٣,٤ صورةً لامرأةٍ تَقِفُ إلى جانبِ طفلةٍ صغيرة. إنَّ الفهمَ الطبيعيَّ لصورةٍ كهذهِ هو أنَّ المرأة هي أمٌّ للطفلةِ الصغيرة. ولكنْ ماذا لو أخبرتُكَ بأنَّ الأمرَ هو العكس؟ قد تقولُ بأنَّ ذلكَ غيرُ ممكن، . . . ما لَمْ تكُنِ الصورتانِ قد التُقِطتا في زمنيْنِ مختلفيْنِ ثم تمَّ وضعُهما معاً. لقد التُقِطَتْ صورةُ الأمِّ عندما كانت طفلةً صغيرة وأمّا صورةُ البنتِ فلقد أُخِذَتْ حديثاً.

إنّ الصُّوَرَ الفلكيةَ غالباً ما تكونُ مِن هذا القبيل. وعندما تظهرُ صورةُ نجمٍ أو مجرّةٍ ما علىٰ لوحِ التصوير، فإنها تنطبعُ بوساطةِ الضوءِ الذي وصلَ اللوحَ مِن المصدر. وإذا كانَ الجِرْمُ يبعدُ عنا ألفَ سنةٍ ضوئيةٍ، مثلاً، فإنَّ هذا الضوءَ يكونُ قد استغرقَ ألفَ سنةٍ لإكمالِ رِحلتِهِ إلينا. وبعبارةٍ أخرىٰ، فإنّ الصورةَ تُنبئنا عما كان يبدو عليه ذلك المصدرُ

---

(١) نُذكِّرُ القارئَ بأنَّ السنةَ الضوئيةَ هي المسافةُ التي يقطعُها الضوءُ في السنةِ الواحدة، وهي تَقْرُبُ مِن حوالىٰ عشرةِ آلافِ بليونِ كيلومتر. د.س



الشكل ٣,٤: في صورةِ الأمِّ - البنتِ هذه، مَن هي الأمّ؟

قبلَ ألفِ عام، وليس عمّا هو يبدو عليه **اليوم**. وهكذا فإننا إذا ما نظرْنا إلىٰ نجميْنِ اثنين، في صورةٍ ما، فإننا لا نراهُما كما هُما عليهِ اليوم. وقد يبدو نجمٌ أقربُ إلينا أصغرَ عمراً مِن نجمٍ بعيد، ولكنَّ الحقيقيةَ قد تكونُ عكسَ ذلك[1].

ونعودُ إلىٰ سديم السرطان، فنقولُ بأنَّ ما نراهُ في الصورةِ يَقَعُ علىٰ بُعْدِ ٥٠٠٠ سنةٍ تقريباً عنّا. فعندما رأىٰ الصينيون «النجمَ الضيفَ»، عامَ ١٠٥٤م، فإنّ الحدثَ كان قد جرىٰ قبل ٥٠٠٠ عامٍ مِن ذلك. وكذلكَ إذا ما نظرْنا إلىٰ الشكلِ ٣,١ اليومَ، فإننا نرىٰ ما كان عليهِ الحالُ قبلَ ٥٠٠٠ عامٍ مِن الآن. وإذا ما أردنا أن نعرفَ ما الذي هو عليه الآن، فإنَّ علينا أن ننتظرَ ٥٠٠٠ عامٍ أُخرىٰ.

---

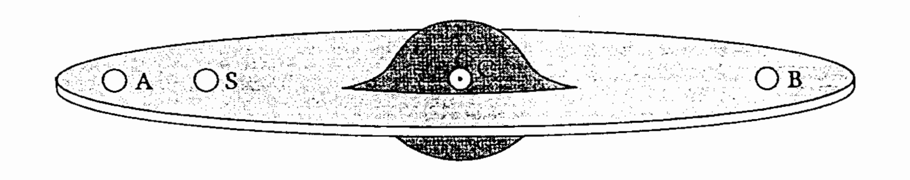
(١) وقد يبدو النجمُ القريبُ إلينا شيخاً، ولكنَّ النجمَ الأبعدَ منه قد يبدو فَتِيّاً، ولكنه في واقعِ الحالِ قد شاخَ وصارَ عملاقاً في دور الاحتضار، ولكنَّ ضوءَه الذي نراهُ الآنَ إنما هو صدرَ عنه مُذْ كان شابّاً يافعاً. د.س

النجومُ المُنفجرة

وأما وقد أزَلْنا سوءَ الفهمِ الناجمِ عن عاملِ الزمنِ، فلنستكشفْ ما حدثَ فعلاً، عندما رأىٰ الصينيونَ النجمَ وهو يظهرُ، ثمَّ وهو يخبو. ومِن خلالِ تجميعِ المعلوماتِ المتناثرةِ مِن كلِّ المدوناتِ حولَ الحدثِ، وما يتَّصلُ به مِن النظرياتِ الحديثةِ حولَ النجوم، فإنَّ الجوابَ هو أنّ النجمَ قد أصبح **مُستَسْعِراً أعظمَ supernova**[1]، ناشراً معظمَ غلافِه الخارجيِّ في انفجارٍ عملاق.

ولماذا انفجرَ ذلكَ النجمُ؟ هل كان ذلك حدثاً استثنائياً، أم إنَّ النجومَ كلَّها تنفجرُ؟ وهل شاهدَ الفلكيونَ انفجاراتٍ مُشابهةً في السنين الأخيرة؟

لسوف نتناولُ هذهِ الأسئلةَ كلَّها، ولكنْ ليس بالضرورةِ بالترتيبِ ذاتهِ الذي جاءتْ بهِ في السؤال. فلنأخذْ، مثلاً، السؤالَ الأخيرَ أولاً. لقد شوهِدَ، بعدئذٍ، حَدَثانِ اثنانِ مُشابهان، في مجرَّتِنا نحنُ، مجرةِ دربِ التبّانة Milky Way Galaxy. ولقد شاهدَ الفلكيُّ المشهور تايكو براهي Tycho Brahe مستسعِراً أعظمَ، في عام ١٥٧٤م. وبعد



الشكل ٣،٥: إنّ مجرّتَنا، مجرّة دربِ التبانة Milky Way Galaxy، هي مجموعةٌ مِن مائةٍ إلىٰ مائتيّ بليون نجم، منتشرةٌ علىٰ شكلِ قرصٍ منتفخ قليلاً في مركزه. ونحنُ نقعُ علىٰ مسافةٍ تَقْرُبُ مِن ثلثيّ الطريقِ نحو حافّةِ القرص، حيثُ نرىٰ الشمسَ مُشاراً إليها بالحرف S. إنَّ بُعْدَ الشمسِ S عن مركزِ المجرّةِ C، يزيدُ علىٰ ٣٠٠٠٠ سنةٍ ضوئية. وقد يكونُ هناك مستسعِرٌ أعظمُ نموذجيٌّ قرب مركزِ المجرّةِ، أو في نقطةٍ تقعُ علىٰ الجهة الأبعدِ مِن القرصِ، كالنقطةِ B، مثلاً. وبسببِ الامتصاصِ الناجم عن المادةِ البينيةِ في المجرّةِ، فإنّ مِثلَ هذه المستسعراتِ العظمىٰ قد لا يمكنُ رؤيتها مِن الموقع S. ولكنَّ المستسعراتِ القريبةَ منّا، في مواقع مِثلَ A، سوف يمكنُ مشاهدتُها، ولكنَّ أعدادَها سوف تكونُ قليلةً نسبياً.

---

(١) تعني كلمةُ Nova، حرفياً، الجديد، وهي تُطلَقُ علىٰ ما صارَ يُعرَفُ بالنجم المتفجر، أو المستسعِر الأعظم. د.س

ثلاثةِ عقودٍ، وفي عام ١٦٠٤م، شاهدَ مُساعِدُهُ السابقُ والفلكيُّ المتميِّزُ بذاتهِ جوهانز كِپلر Johannes Kepler، مستسعراً أعظمَ آخَر. ولـم يُشاهَدْ أيُّ مستسعرٍ أعظمَ آخَرَ منذ ذلك التاريخ، بل ومنذُ استخدامِ المِرْقاب (التلسكوب) في علم الفَلَكِ (عام ١٦٠٩م). ولكنَّ ذلك لا يعني أنّ المستسعراتِ العظمىٰ تحدثُ في مجرّتنا بمعدّلِ مرّةٍ في كلِّ قرونٍ قليلةٍ من الزمان، بل يُعتقَدُ بأنها أكثرُ حدوثاً بكثير، إذ ينفجرُ في مجرّتِنا، في المعدّلِ، نجمٌ واحدٌ كلَّ عشرينَ عاماً تقريباً. وكما أوضحْنا في الشكل ٣,٥، ولأنَّ المجرَّةَ شاسعةُ الأطراف، ولأنَّ الضوءَ الآتيَ مِن مناطقِها الأخرىٰ يتمُّ امتصاصُه، فإنَّ مُعظمَ تلك الأحداثِ محجوبٌ عن أعيننا. إنَّ المستسعِراتِ العُظمياتِ الثلاثة التي أمكنَنا رؤيتُها قد وُجِدَتْ في ذلك الجزءِ القريب منّا مِن المجرّة.

وعلىٰ الرغم مِن ذلك، فلقد تمّتْ مشاهَدةُ مُستسعراتٍ عُظْمَياتٍ في كلِّ عام، وهي تُعَرَّفُ في كلِّ عامٍ بِحَسَبِ تسلسلِها الزمنيِّ، باستخدام الحروفِ الأبجدية. وهكذا فإنَّ المستسعرَ الأعظمَ 1987 A كان أولَ واحدٍ منها يُشاهَدُ في سنة ١٩٨٧. ولسوف نذكرُ المزيدَ عن هذا المستسعرِ الأعظم بالذات، فيما بعد.

ونأتي الآنَ إلىٰ السؤال: **لماذا تنفجرُ النجوم؟**

نشوءُ وتطوّرُ النجومِ العملاقة

لقد حَدَسَ كِپلر Kepler، في كتابه المطبوع عامَ ١٦٠٦، والموسوم باسم **بحث في النجم الجديد De Stella Nova**، بأنّ المستسعرَ الأعظم supernova قد يكونُ نِتاجاً لِتَرَكُّزٍ تصادفيٍّ لجُسيماتِ المادةِ في السماء. وقد قدَّمَ ما وصفَهُ بأنه:

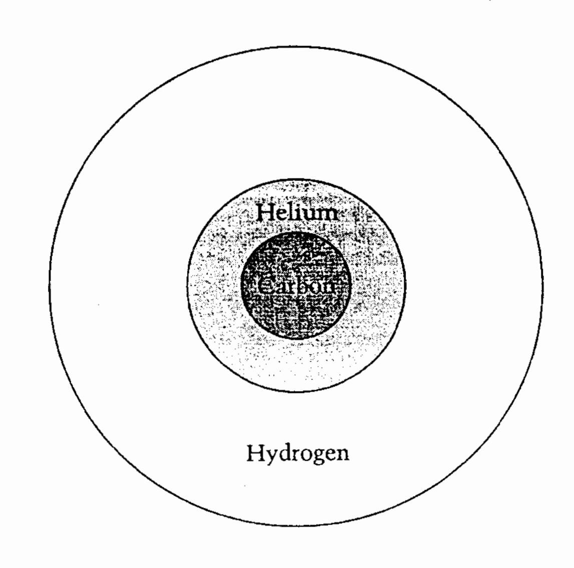
> ... ليس رأييَ الخاصَّ، ولكنه رأيُ زوجتي، فلقد دُعِيتُ إلىٰ العشاءِ بالأمسِ، وكنتُ مُرْهَقاً مِن الكتابة، وكانت السَّلَطَةُ التي طلبتُها موضوعةً أمامي. وقلتُ: «يبدو أنْ لو قد طارَ الإناءُ المصنوعُ مِن القِصديرِ، وأوراقُ الخسِّ، وحبيباتُ الملحِ، وقطراتُ الماءِ، والخَلُّ، والزيتُ، وشرائحُ البيض، في الهواءِ في الأبديةِ، فلقد يحدثُ أخيراً، وبفعلِ المصادفةِ، أن تَنْتُجَ السَّلَطةُ منها». وأجابتني حبيبتي: «نعم، ولكنّها لن تكونَ لذيذةً كسلطتي هذه».

إنَّ المستسعِرَ الأعظمَ ينشأُ، في صورته الحديثة، كنتيجةٍ نهائيةٍ لتطوّرِ النجم بالِغ الضخامة، وهي مرحلةٌ يصلُها النجمُ العملاقُ الأحمرُ عندما لا يعودُ قادراً علىٰ المحافظةِ علىٰ توازنه. ولكنْ، كيف تنشأُ هذه الحالة؟

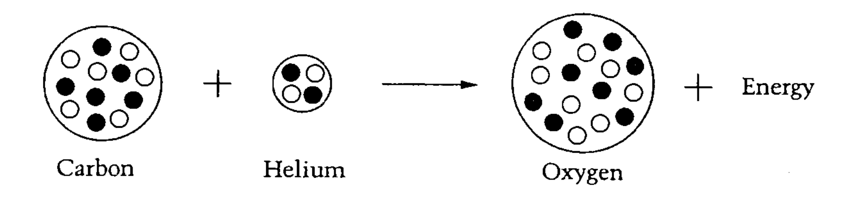
لقد ناقشْنا موضوعَ حالةِ العملاقِ الأحمر red giant star، لنجم كالشمس، في الفصلِ السابقِ، وهي حالةٌ يبلغُها النجمُ عندما يكونُ قد استنفدَ وَقودَه الهايدروجينيَّ وتحولَ إلىٰ استخدامِ وقودٍ آخر، وهو اندماجُ الهيليوم. ولقد وجدْنا أنّ حدوثَ هذا التغيُّرِ في داخلِ النجمِ يؤدي إلىٰ انتفاخِ غلافِه الخارجيّ. ويؤدي توسّعُ وانتشارُ غازاتِ الغلافِ الخارجيِّ إلىٰ تقليلِ درجةِ حرارةِ سطحِ النجم، وهو ما يؤدي بالنجمِ إلىٰ أن يبدوَ أضخمَ حجماً ولكنْ أكثرَ احمراراً.

ونُتابعُ هذهِ القصّةَ ابتداءً مِن هذهِ المرحلة، إذ يُرينا الشكلُ ٣,٦ حالةَ النجمِ بعدَ أن يكونَ قد استنفدَ الهيليومَ الموجودَ في مركزِهِ كلِّه، في عمليةِ الاندماج. ولسوفَ يحتوي الجزءُ المركزيُّ منه الآنَ علىٰ الكاربونِ، مُحاطاً بغلافٍ مِن الهيليوم الذي ليس مِن السخونةِ بما يكفي حتىٰ يُديمَ اندماجَه، وهذا بدورهِ يحيطُه غلافٌ مِن الهايدروجينِ الأكثرِ برودةً. ولأنَّ النجمَ لم يَعُدْ لديه ما يسحبُه مِن مخزونه مِن الهيليوم، فإنَّ النجمَ يجدُ نفسَهُ مرَّةً أخرىٰ في مرحلةٍ مصيريةٍ من عمره.

نحنُ نتذكرُ بأنَّ عمليةَ توليدِ الطاقةِ المركزيةِ هي التي حافظتْ علىٰ درجةِ الحرارةِ والضغطِ العاليَيْنِ في مركزِ النجم، إذ إنها تحافظُ عليه في حالةِ توازنٍ ضدَّ نزعةِ التقلّصِ نحو الداخلِ، والناتجةِ عن قوّةِ جاذبيتها الذاتية. وبتوقُّفِ مصدرِ الطاقةِ، لا يعودُ هناك مِن مانعٍ يمنعُ تقلُّصَ مركزِ النجمِ نحو الداخلِ. وعندما يحدثُ ذلكَ، ينشأُ تطوّرٌ آخَرُ جديد.



الشكل ٣,٦: يتكوّنُ النجمُ العملاقُ مِن ثلاثِ طبقاتٍ، ويقع الكاربونُ في الداخلِ منه، والهيليوم في غلافه الداخليّ، وأمّا الهايدروجين فهو يقعُ في قِسمِه الخارجيّ.



الشكل ٣,٧: تملِكُ ذرّةُ الكاربونِ ١٢ جُسيماً، بينما تحتوي ذرةُ الهيليوم علىٰ أربعةٍ منها. وينتجُ عن اندماجهما تكوينُ نواةِ أوكسجينٍ بـ ١٦ جُسيماً. وتظهرُ البروتوناتُ علىٰ شكلِ دوائرَ مليئةٍ، بينما تظهرُ النيوتروناتُ علىٰ شكلِ دوائرَ مفتوحة. إنَّ هذه العمليةَ تُحرِّرُ مِن الطاقةِ ما يُمَكِّنُ النجمَ مِن الاستمرارِ في توهجه.

إذ يصبحُ مركزُ النجمِ، بسببِ تقلّصِهِ، أكثرَ سُخونةً، ويصلُ إلىٰ مستوىً يبدأُ معه تفاعلٌ اندماجيٌّ جديد. ويجتذبُ هذا التفاعلُ نَوىٰ الكاربونِ في المركزِ، ونَوىٰ الهيليومِ الموجودةَ أيضاً قريباً، لصنعِ نواةٍ هي أكبرُ حتىٰ مِن ذلك، وهي نواةُ الأوكسجين (الشكل ٣,٧).

ولهذا التفاعلِ ثلاثةُ آثارٍ. وأولُها، بالطبعِ، أنَّ تزويدَ مصدرٍ جديدٍ للطاقةِ يُمكِّنُ النجمَ مِن أن يتوهَّجَ بقوةٍ متجددةٍ وإضاءةٍ زائدة. وثانيهما، أنه يجعلُ مركزَ النجمِ مستقرّاً، أي أنه يزوّدُه بمكْبَحٍ يُفَرْمِلُ مِن تقلّصِه، مِن خلالِ تجهيزِ الضغوطِ الكافيةِ في داخلِ النجم. وثالثهُما، أنه يجعلُ الغلافَ النجميَّ يتوسّعُ إلىٰ أكثر مِن ذلك. ولسوفَ يبردُ الغلافُ، بسببِ توسّعِه، وسيبدو حتىٰ أكثَر احمراراً. وكما نرىٰ في الشكل ٣,٨، فإنَّ النجمَ يتحركُ علىٰ مُخطَّطِ هـ ـ ر، نحو الأعلىٰ واليمينِ، أكثرَ وأكثر.

فلنتوقّفْ قليلاً حتىٰ نعلِّقَ علىٰ مسلكٍ غريبٍ للنجمِ، إذا ما حكمْنا عليه بمعاييرِ خبرتِنا اليومية. إنَّ خِبرَتَنا تُنبئُنا بأننا عندما نضعُ جسماً حارّاً علىٰ تماسٍّ بجسم بارد، فإنَّ الحرارةَ تنتقلُ مِن الأولِ إلىٰ الثاني، وينتجُ عن ذلكَ أنّ الجسمَ الحارَّ يصيرُ أبردَ مِن ذي قبل، ويصيرُ الجسمُ الباردُ أكثَر سُخونةً، حتىٰ يمتلكَ الجسمانِ درجةَ الحرارةِ ذاتَها.

وتصوّرْ تجربةً فكرية، نوصِلُ فيها نجماً ساخناً بنجم باردٍ، مِن خلالِ سلكِ توصيل. . نحن نتوقعُ بأنّ الحرارةَ سوف تنتقلُ مِن النجم الساخنِ إلىٰ النجم البارد، وهو ما يحدثُ فعلاً. ولكنْ عندما يفقدُ النجمُ الحارُّ طاقَةً بهذهِ الطريقة، فإنه يجدُ بأنَّ الضغوطَ الداخليةَ فيه قد انخفضت، ولذا فإنّ قواهُ الجاذبيةَ تدفعُه نحو الداخلِ حتىٰ يصلَ إلىٰ حالةِ توازنٍ جديدة. وفي هذهِ الحالةِ، فإنّ النجمَ يصيرُ أكثَرَ سُخونةً مرّةً أخرىٰ، بسببِ الانضغاط.

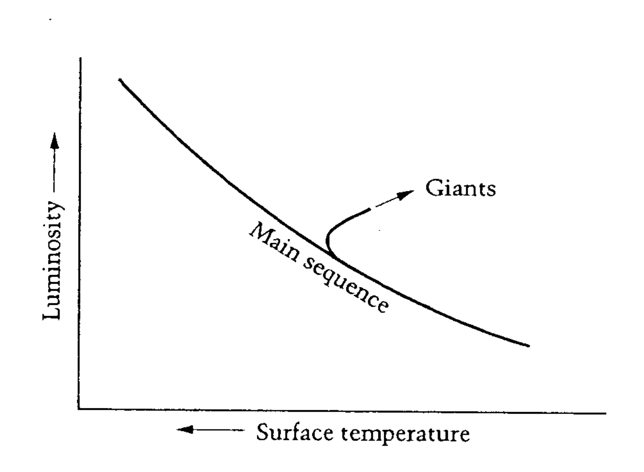
وكذلكَ فإنَّ النجمَ الباردَ يكتسبُ طاقةً، وهو ما يرفعُ الضغوطَ الداخليةَ فيه، ويجعلهُ يتوسّعُ إلىٰ حالةٍ جديدةٍ مِن التوازن. وفي هذه الحالةِ، وبسببِ التوسّعِ، فإنّ النجمَ يصيرُ أبردَ مِن ذي قَبْل. وبعبارةٍ أخرىٰ، فإنَّ النجمَ الساخنَ يصبحُ أكثرَ سُخونةً، والنجمُ الباردُ يصيرُ أبرد!

ورغم أننا لا يمكننا أن نحصلَ، في الحياةِ العملية، علىٰ الأحوالِ ذاتِها التي وصفناها في تلك التجربةِ الفكرية، فإننا نقتربُ منها في حالةِ العملاقِ الأحمر. ولْنلاحظْ بأنَّ قلبَ النجمِ وغلافَهُ هما علىٰ تماسٍّ مع بعضِهما البعض، وبينما يصبحُ المركزُ أكثرَ سخونةً في كلِّ مرحلةٍ جديدة، فإنَّ الغلافَ يصيرُ أبرد.

ويَنتُجُ هذا السلوكُ الغريب، بالطبع، بسببِ قوّةِ الجاذبيةِ التي تُملي دائماً حالةَ توازنِ النجم. ولسوف نناقشُ آثاراً للجاذبيةِ، أغربَ مِن ذلك، في الفصل الخامس.

أصلُ العناصرِ الكيمياوية

لو عُدْنا إلىٰ النجمِ في نشوئِه وتطوره، فلسوفَ يُواجهُنا السؤالُ، مرّةً أخرىٰ، وعاجلاً أم آجلاً: ما الذي يحدثُ عندما يَنْفَدُ وقودُ الكاربون؟ إنَّ ذلكَ لَهُوَ أمرٌ حتميٌّ في نهايةِ المطافِ. وإذا ما حدثَ ذلكَ، فإنّ مستقبَلَ النجمِ، مَرَّةً أخرىٰ، هو مِمّا يمكنُ التنبؤُ به. فلسوفَ يتقلّصُ مركزهُ، وتزدادُ سخونتُه إلىٰ درجةِ حرارةٍ عاليةٍ، وبما يكفي حتىٰ لتفجيرِ تفاعلٍ آخر. وفي هذا المرةِ يتّحِدُ الأوكسجينُ مع الهيليوم، لتكوين النيون neon الذي تحتوي ذرتُهُ علىٰ ٢٠ جسيمةٍ في نواتها. ويحرّرُ الاندماجُ، مِن جديدٍ، طاقةً



الشكل ٣,٨: يُظهِرُ مخطَّطُ هـ ـ ر (H - R diagram) هذا كيف أنَّ النجمَ يتحركُ عَبْرَ فرعِ النجومِ العملاقةِ باتجاهِ السَّهم.

إضافية، وهو ما يجعلُ النجمَ قادراً علىٰ الديمومةِ حِقبةً أخرىٰ. ومع هذه العمليةِ فإنَّ النجمَ يتقدمُ علىٰ طولِ فرعِ العمالقةِ، أكثرَ فأكثر، في مخطّطِ هـ ـ ر.

وهكذا تصيرُ لدينا سلسلةٌ مِن التفاعلاتِ التي تبني نَوىً أثقلَ وأثقل، ويزدادُ عددُ الجسيماتِ، في كلِّ نواةٍ تاليةٍ، أربعاً عمّا كان عليه في النواةِ التي كانت مِن قبل، لأننا نُضيفُ، في كلِّ مرّةٍ، أربعَ جسيماتٍ مِن خلالِ الاندماجِ بنواة الهيليوم. ويصيرُ تَتابُعُ العناصرِ المتكونةِ، بهذه الطريقة، كالآتي: كاربون (١٢)، أوكسجين (١٦)، نيون (٢٠)، مغنيسيوم (٢٤)، سيليكون (٢٨)، كبريت (٣٢)، وهَلُمَّ جَرّا. وهي تُؤلِّفُ ما يُعْرَفُ بِسُلَّم جسيمةِ ألفا alpha - particle ladder، وهو أُسْمِيَ كذلك لأنّ نواةَ الهيليوم تُعْرَفُ أيضاً باعتبارها **جسيمةَ ألفا alpha particle**.

وإلىٰ متىٰ يستمرُّ هذا التتابُعُ؟ إنَّ الجوابَ يكمُنُ في الفيزياءِ النووية. فلنمعِن النظرَ في القوةِ التي تُمسِكُ النواةَ إلىٰ بعضها البعض.

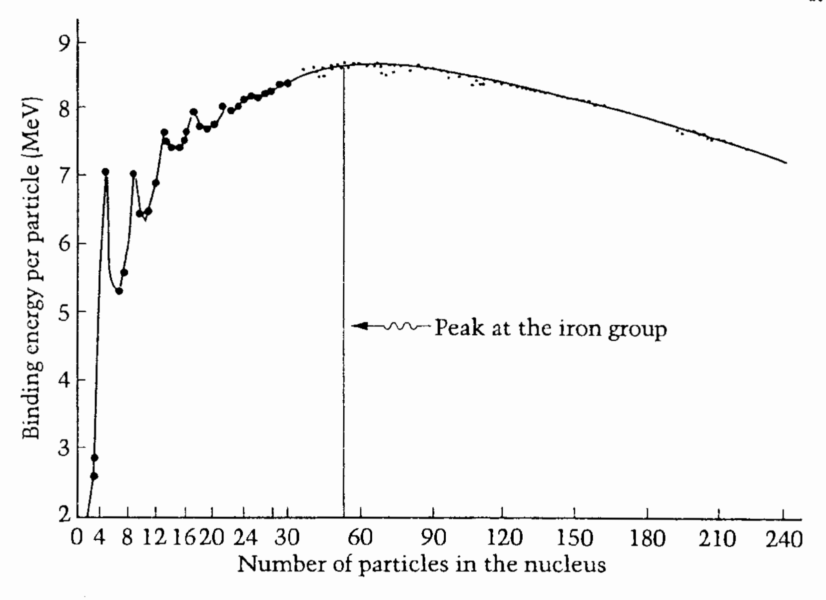
إنَّ هذه القوةَ، وكما رأينا في الفصلِ السابق، هي قوّةٌ جاذبةٌ قوية، ولكنَّ مَداها قصيرٌ جداً، إذ إنه يبلغُ، في الأحوالِ النموذجيةِ، جزءاً مِن مليونِ مليونِ جزءٍ مِن المِتر. وقوةُ الجاذبيةِ، داخلَ هذا المدىٰ، هي أقوىٰ مِن قوّةِ التنافرِ الكهربائيِّ التي تعملُ بين أيِّ بروتونيْن. ولذا فإننا عندما نبدأُ في بناء نَوىً أكبرَ وأكبرَ، فإنه لَيُساعِدُنا في بدايةِ الأمر، أن نُضيفَ نيوتروناتٍ وبروتوناتٍ أكثرَ وأكثر، لأنَّ قوةَ الجذبِ النوويةَ لا تشجِّعُ فقط علىٰ إضافةِ جسيماتٍ أكثرَ إلىٰ الحضيرةِ ولكنها تزيدُ مِن قوّتها أيضاً.

ويُضيفُ العملُ الذي تقومُ به النواةُ، في جذبِ وإدخالِ جزيئاتٍ أكثرَ وأكثر، إلىٰ مخزونِ الطاقةِ التي سوف يصيرُ في مقدورِ النجمِ أن يشعَّها. وهذا هو السببُ في أنّ دمجَ جسيماتٍ أكثرَ، بالنواة الموجودة، يُديمُ مِن توهّجِ النجم. ولكنَّ ذلكَ لا يمكنُ أن يستمرَّ إلىٰ الأبد. ومثلما أنَّ الأمبراطوريةَ الكبيرةَ تبدأُ في فقدانِ تماسكِها عند انتشارها أكثرَ مِن اللازم، أو أن يبدأ الجيشُ المحاربُ في فُقدانِ فعاليته عندما يصبحُ خطُّ تجهيزهِ مُتطاولاً جداً، فكذلكَ تفعلُ نواةُ الذرّةِ عندما تبدأ في فقدانِ استقرارها، عندما يكبر حجمُها كثيراً. وهناك سببانِ لذلك: أولاً، إنَّ مدىٰ قوةِ الجذبِ بين الجسيماتِ محدودٌ جداً، وإذا ما كانت جُسيمتانِ بعيدتيْنِ جداً الواحدة عن الأخرىٰ، فإنهما سوف تتوقّفانِ عن جذبِ إحداهُما للأخرىٰ. ثانياً، إنّ إضافةَ بروتوناتٍ أخرىٰ إلىٰ المنظومةِ يزيدُ مِن التنافرِ الإلكتروستاتيكيِّ فيها، وهو ما يُضعِفُ مِن ترابطِ النواة.

وهكذا، فعندما يصلُ عددُ الجسيماتِ إلىٰ ٥٦ جُسَيْماً، فإنَّ النواةَ تكونُ قد وصلت مرحلةً تؤدِّي فيها أيّةُ إضافةٍ إلىٰ عكسِ المطلوب. ويعني ذلك أنّ النواةَ الجديدةَ لن تتماسكَ معاً بالقوةِ التي كانت عليها، ولن يستمرَّ النجمُ علىٰ تخفيضِ طاقتهِ مِن خلالِ التقدُّمِ أكثرَ وأكثرَ عَبْرَ مسارِ الاندماج. ويبيّنُ الشكلُ ٣,٩ كيف أنَّ تماسكَ النجمِ يتغيّرُ بإضافةِ نوىً أكثرَ وأكثر. إنَّه يزدادُ ثم يقِلّ.

والنَوىٰ التي هي في القِمّةِ مِن صفةِ الارتباطِ هذهِ هي نَوىٰ الحديد والكوبلت والنيكل. وهنا يكونُ النجمُ قد وصلَ إلىٰ نهايةِ الطريق، ما دامَ إنتاجُ الطاقةِ مستمراً. وعند ذاك، تكونُ درجةُ الحرارةِ في مركزِ النجمِ قد ارتفعت إلىٰ عِدَّةِ **بلايين** مِن الدرجات. ولكنْ لم يَعُدْ هناك مِن مصدر طاقةٍ آخرَ حتىٰ يُديمَها بهذا الشكل. وما الذي سوف يحدثُ بعدئذٍ؟

لقد نوقِشَ هذا السؤالُ مِن قِبَلِ أربعةِ فيزياويينَ فلكيّين، عامَ ١٩٥٦، ضمنَ القضيةِ الأوسعِ لأصلِ العناصرِ الكيمياوية. كان هؤلاءِ هم جيوفري ومارغريت بيربج، ووليم فاولر، وفريد هويْل. وكان السؤالُ الذي سألوهُ هو: كيف حدثَ أن امتلكَ الكونُ تلكَ التشكيلاتِ كلَّها مِن العناصرِ الكيمياويةِ التي نجدُها فيه؟ وهل يمكنُ أن نفهمَ سببَ وفرتِها النسبية؟



الشكل ٣,٩: يُبيّنُ هذا المنحنىٰ أنّ قمّةَ قوةِ الارتباطِ، في نواةِ الذرة، يتمُّ الحصولُ عليها عندما تنتمي النواةُ إلىٰ مجموعةِ الحديد، وهناك حوالىٰ ٥٦ جسيمةً في النواة.

ذلكَ لأنه يمكنُ للمرءِ، مِن خلالِ المشاهداتِ الفلكيةِ، أن يحصلَ علىٰ تقديرٍ معقولٍ نسبياً للوفرات النسبية. وكما اكتشفنا في موضوعِ النجوم، فإنّ السبيلَ إلىٰ ذلكَ هو في دراسةِ الطَّيْف spectroscopy (انظرْ الفصلَ الثاني). ولقد قامَ المذكورون (وقد صاروا يُعرَفونَ معاً باسم B^2 F H، نسبةً إلىٰ الحروفِ الأولىٰ مِن أسمائهم، وهم يظهرون معاً في الشكل ٢,٣٦) باستنباطِ طريقةٍ أشبه بدرجاتِ السُّلَّم لبناءِ نَوىً أكبرَ وأكبر، وُصولاً إلىٰ الحديد. كما أنهم أظهروا بأنَّ العملياتِ السريعةَ والبطيئة التي تتضمنُ إضافاتٍ للنيوترونات وانحلالاتِها يمكنُ أن تؤدِّي إلىٰ بناءِ عناصرَ أثقلَ كالذهبِ، والفضةِ، واليورانيوم، وهَلُمَّ جرّا، رغمَ أنّ هذه العملياتِ لا تجهّزُ أيةَ طاقةٍ للنجوم.

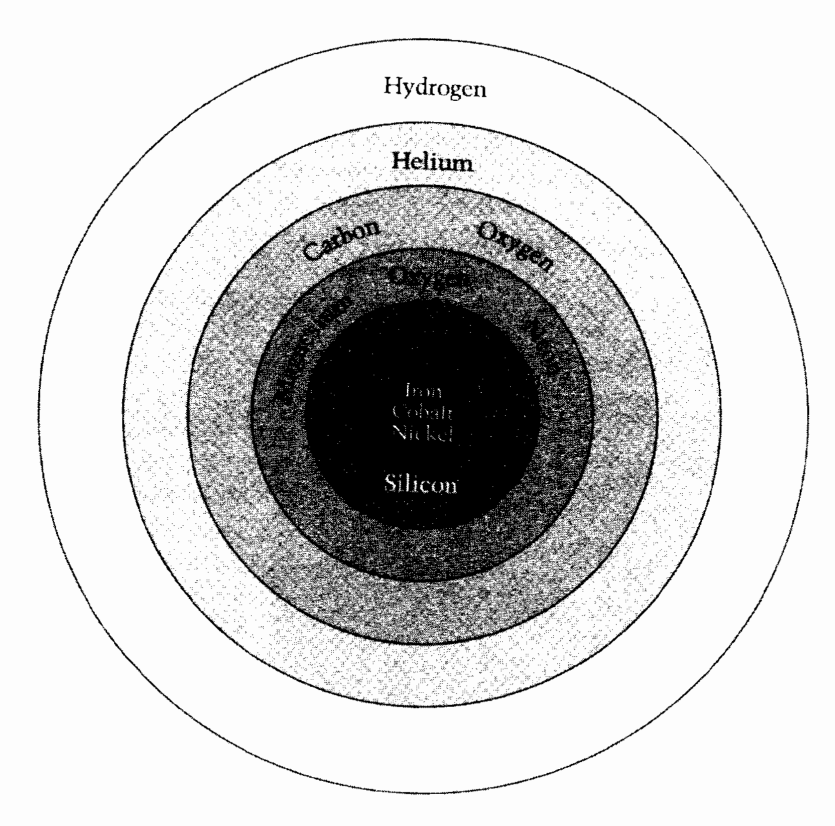
نظرةٌ إنسانية An anthropic consideration

وصفنا في الفصلِ السابقِ كيف أنّ فريد هويْل قد تنبأَ بوجودِ مُستوىً مُثارٍ مِن نواةِ الكاربون، عندما كان يدرسُ حالةَ النجمِ الذي استنفدَ للتوِّ وقودَهُ الهايدروجينيَّ مِن خلالِ عمليةِ الاندماج. والسببُ في ضرورةِ وجودِ مثلِ هذه الحالة، حَسَبَ هويْل، هو أنَّهُ عندها فقط يمكنُ أن يحدثَ اندماجٌ رنّانٌ resonant fusion لثلاثِ نَوىً مِن الهيليوم لتكوينِ نواةِ كاربونٍ واحدة. إنَّ «الرنين» يساعدُ علىٰ تسريعِ عمليةٍ هي بطيئةٌ مِن دونه، لأنَّ إمكانَ تلاقي ثلاثِ نوىً مِن الهيليومِ معاً لهو احتمالٌ نادرٌ نسبياً. وبسبب هذا التفاعل، يمكنُ للنجمِ أن يستمرَّ في توهجه، وأن ينتقل إلىٰ حالةِ العملقة. إنَّ حقيقةَ وجودِ نجومٍ عملاقةٍ تعني بالضرورةِ أنَّ هناكَ عمليةً كهذه لتجهيزها بالطاقة.

لا بَلْ كان لدىٰ هويْل دافعٌ أقوىٰ للقيامِ بذلك الحدس، إذ مِن دونِهِ يبدو أنْ لا سبيلَ ثَمَّةَ إلىٰ صنعِ عناصرَ كالكاربونِ والأوكسجين. وتَخَيَّلْ كوناً مِن دونِ هذه العناصر، فالعائقُ الرئيسيُّ سوف يكمنُ في عدمِ وجودِ تلكَ الحياةِ التي نعرفُها. وهكذا فإنَّ حقيقةَ وجودِنا، نحنُ البشرُ، حتىٰ نرىٰ الكونَ، يجعلُ مِن الضروريِّ أن يكون الطريقُ إلىٰ صنعِ الكاربونِ والأوكسجينِ مفتوحاً.

ما الذي يجعلُ النجومَ تنفجرُ؟

وهكذا، فعندما يتمُّ صنعُ عناصرِ مجموعةِ الحديد، فإنَّ تركيبةَ النجم تكونُ أشبهَ شيءٍ بتركيبةِ أو طبقاتِ البصلِ onion-skin، التي نراها في الشكل ٣,١٠، مع وجودِ لعناصرِ مجموعةِ الحديدِ في الجزءِ المركزيّ والعناصرِ الأخفِّ في الغلافاتِ الخارجية.



الشكل ٣,١٠: يمتلكُ النجمُ تركيبةً مِن عدّةِ طبقاتٍ هي أشبهُ بتركيبِ البصلةِ، عندما يكونُ قد وصلَ إلىٰ نهايةِ مرحلةِ صُنعِ النَّوىٰ، مِن خلالِ الاندماج. ولسوف تشغلُ النوىٰ الأخفُّ فالأخفُّ الغلافاتِ الخارجيّةَ المتتاليةَ منه.

لقد بلغَ النجمُ مرحلةً حرجةً مِن وجوده، لأنَّ عواملَ جديدةً قد دخلت في الحُسبان، وهي عواملُ يمكنها أن تقرّرَ إن كان النجمُ سوف يعيشُ أو ينفجر.

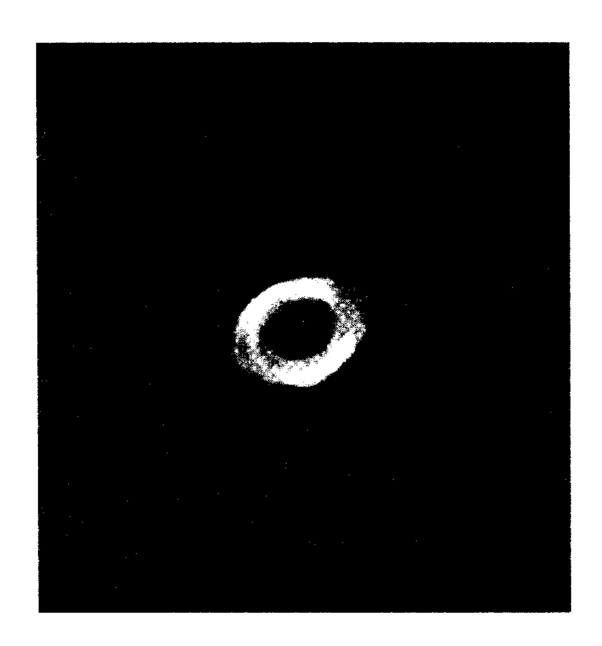
ومِن المفيدِ أن نُشَبِّهَ ذلك بنا نحنُ البشر. فإذا ما دَلَفْنا إلىٰ أواسطِ عُمرِنا، فإنَّ أطباءنا ينصحونَنا بالمحافظةِ علىٰ أوزانِنا ضمنَ حدودٍ معقولة. فأَنْ تكون بديناً جداً يعني أنك تعرِّضُ نفسك للمتاعب، مثل ارتفاعِ ضغطِ الدم، ومرضِ القلب، وما إلىٰ ذلك. ولذا فإنّ العقلاءَ مِن الناس يقللونَ مِن أوزانِهم الزائدة بإجراء التمارينِ الرياضية وبالحِمْيَةِ الغذائية، وقد يكونونَ أكثرَ احتمالاً لأنْ يعيشوا حياةً طويلةً مِن دونِ مَرَض. أمّا أولئك الذين لا يلتزمونَ بذلك، فقد يتوجبُ عليهم أن يدفعوا الثمنَ، وهو الموتُ المبكّر.

ويوجدُ، كذلكَ، حدٌّ لكُتَلِ النجوم، وهو يبلغُ ستةَ أضعافِ كتلةِ الشمسِ تقريباً.

وأمّا النجومُ التي هي دونَ هذا الحدِّ، خلالَ مرحلةِ العملاقِ الأحمر، فإنَّ لها عمراً طويلاً، وحياةً غيرَ حافلة بالمخاطراتِ، ومستقبلاً آمناً نسبياً. وتقذِفُ هذهِ النجومُ تدريجاً بأجزاءَ صغيرةٍ مِن غلافها الخارجي، مِثل حلقاتِ الدخانِ التي ينفثُها المدخِّنُ. ويُرينا الشكلُ ٣,١١ حلقةً كهذه، وهي غالباً ما تُعرَف **«بالسَّديم الكوكبي» planetary nebula**. وهي أُسمِيَتْ بالسديم، لأنها تشبهُ السحابةَ في بِنيتِها، وبالكوكبيِّ، لأنها تُضاءُ مِن قِبَلِ النجمِ الأمِّ مثلما يُضاءُ الكوكبُ السَّيار.

ومِن خلالِ قذفِ «الحَلَقاتِ الدخانيةِ» smoke rings هذه، يتمكنُ النجمُ مِن تقليلِ كتلتِه. وإذا ما تمكّنَ النجمُ من إنقاصِ كتلتهِ بالدرجةِ الكافية، فلسوفَ يكونُ في إمكانه أن يُعمِّرَ طويلاً، علىٰ شكلِ قزم أبيض. وقد ناقشْنا هذه الحالةَ في الفصلِ السابق، حيثُ وجدْنا أنَّ حدَّ الكتلةِ الحرجةِ للقزمِ الأبيضِ يبلغُ نحواً مِن ٤٠٪ فوق كتلةِ الشمس، وهو يُعرَفُ **بحَدِّ شاندراسيكار Chandrasekhar limit**. كما يمكنُ للنجم أن ينتهيَ، أيضاً، علىٰ شكلِ مكثَّفٍ آخرَ يُعْرَفُ بالنجم النيوترونيِّ neutron star، وهو ما يمكنُ أن يبلغَ حَدَّ ضِعفَيْ كتلةِ الشمس. ولسوف نواجهُ النجومَ النيوترونية ببعضِ التفصيل في الفصلِ القادم.

ولْنحوِّلْ نظرَنا الآنَ إلىٰ النجومِ التي لم تكُنْ مِن الحكمةِ بما يكفي، حيثُ إنها



الشكل ٣,١١: سديمُ الحلقة
.The Ring Nebula

تجاوزت حدَّ الكتلةِ الحرجةِ عندما كانت عملاقةً، وهو حدٌّ للكتلةِ يبلغُ حوالىٰ ستّةِ أضعافِ كتلةِ الشمس.

إنَّ مستقبلاً عاصفاً جداً ينتظرُ أمثالَ هذه النجوم.

تفجيرُ المسْتَسْعِرِ الأعظم The triggering of supernova

وكما أنّ استنفادَ نوعٍ واحدٍ مِن الوقودِ النوويِّ يؤدي، في المراحلِ المبكرةِ، إلىٰ تقلّصِ المركزِ الداخليِّ للنَّجم، فكذلكَ يتقلصُ مركزُ النجمِ هنا مرةً أخرىٰ. ولكنَّ درجةَ حرارةِ المركزِ العاليةَ، في الموقفِ الأول، تُبْدِئُ تفاعلاً اندماجياً جديداً. أمّا بالنسبةِ إلى العملاقِ الأحمرِ الذي تتجاوزُ كتلتُهُ حدَّ شاندراسيكار، فإنَّ تلكَ الإمكانيةَ لم تَعُدْ موجودة. وكما رأيْنا الآنَ، فإنَّه لا يمكنُ استخلاصُ طاقةٍ أكبرَ بالاندماجِ إلىٰ ما هو أبعدُ مِن عناصرِ مجموعةِ الحديد. وبدلاً مِن ذلكَ، وبينما يتقلصُ مركزُ النجم، فإنَّ عناصرَ مجموعةِ الحديدِ تتفتّتُ مرةً أخرىٰ متحولةً إلىٰ نَوىٰ الهيليوم، إضافةً إلىٰ بروتوناتٍ ونيوتروناتٍ حُرّةٍ، ومؤديةً إلىٰ فقدانٍ للطاقةِ في المركز. وبدلاً مِن استعادةِ النجمِ لتوازنه، فإنَّ هذه العمليةَ تعجِّلُ مِن عمليةِ تقلصِ المركز.

ويُشارُ إلىٰ ذلك التقلّصِ السريع، غالباً، علىٰ أنَّه **انهيارٌ** للمركز **core collapse**. ولذلكَ آثارٌ خطيرةٌ علىٰ الغلافِ أيضاً. فعندما ينهارُ المركزُ، فإنَّ تأثيرَ الضغطِ الانحلاليِّ المُشابِهِ لذلكَ الذي رأيناهُ في القزمِ الأبيضِ يبدأُ في فِعْلِ فِعْلِه، رغمَ أنَّه يكونُ مؤقتاً.

ويتزايدُ الانحلالُ، أو الاضمحلالُ، في حالةِ القزمِ الأبيض، لأنَّ الإلكتروناتِ تكونُ شديدةَ الانضغاطِ إلىٰ بعضِها البعض. وتَضَعُ قوانينُ ميكانيكِ الكمِّ سقفاً أعلىٰ علىٰ عددِ الإلكتروناتِ، وبمُستوىً محدَّدٍ للطاقةِ التي يمكنُ ضغطُها قريباً مِن بعضِها البعض، في أيِّ حجمٍ مُحدَّد. وهنا، في حالةِ مركزِ المستسعرِ الأعظم، ينشأُ الانحلالُ بسبب انضغاطِ النيوتروناتِ قريباً مِن بعضها البعض. ولكن مِن أين تأتي هذه النيوترونات؟

إنّ تفتُّتَ نَوىٰ مجموعةِ الحديد، في مركزِ النجم، يُنتِجُ نيوتروناتٍ وبروتوناتٍ حرّة. ولا يدوم النيوترونُ في المختبرِ الأرضيِّ طويلاً، إذ إنه يتحللُ في دقائقَ معدوداتٍ، مُنتِجاً إلكتروناً، وبروتوناً، وجُسيمةً تدعىٰ بِضِدِّ النيوترينو antinutrino[1]. ولذا فإنَّ

---

(١) النيوترينو هو جُسَيْمٌ مِن المادةِ يُعتقَدُ بأنه لا يملكُ كتلةً في حالة الاستقرار. ويُعتقَدُ بأنه، في واقع الحال، لا يخلدُ إلىٰ الراحةِ أبداً، بل إنه يتحركُ دائماً بسرعةِ الضوء. إلاّ أنَّ علماءَ فيزياءِ الجسيماتِ لا يستبعدونَ =

النيوترون ليس بالجسيم المستقرِ في الأحوالِ الأرضية. ولكنه يبقىٰ مستقراً، داخلَ نواةِ الذرة، بسببِ القوةِ البالغةِ المؤثرةِ هنا. وعندما ينهارُ المركزُ، يحدثُ تفاعلٌ معاكسٌ لانحلالِ النيوترون. إنَّ المركز يحتوي علىٰ بلازما ذاتِ كثافةٍ عالية، أي مزيجاً مِن الإلكتروناتِ والأيونات (انظر الفصلَ الثاني)، ويحتوي هذا المزيجُ علىٰ بروتوناتٍ حرّةٍ أيضاً. وهكذا يتّحِدُ الإلكترونُ والبروتونُ، في التفاعلِ العكسيِّ، لتكوين نيوترون. وهذا التفاعلُ يحرّرُ النيوترينواتِ أيضاً.

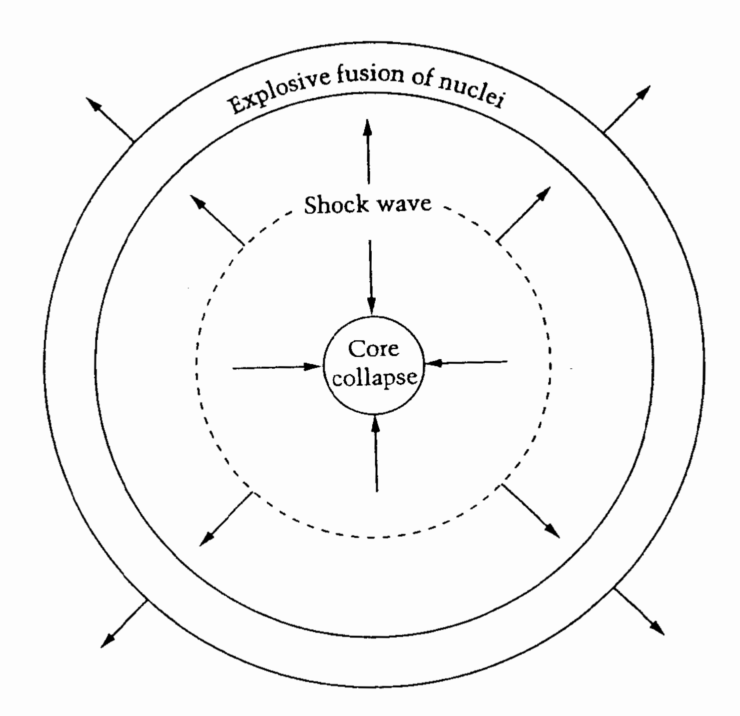
ويحدثُ ذلك كلُّه عندما يتقلّصُ المركز. وتتكوَّنُ النيوتروناتُ، أولاً، بالشكلِ الذي ذكرناهُ، وعندما تزدادُ كثافتُها بسرعةٍ، فإنها تبدأُ في توليدِ ضغطٍ انحلاليٍّ قوي. ويُسبّبُ هذا الضغطُ مقاومةً قويةً لتقلصِ المركز. وهي تنجحُ ليس في إيقافِ التقلّصِ وحسب، وإنما في جعلِ المركزِ يقفزُ أيضاً، وهو شيءٌ أشبهُ بالكرةِ التي تقفزُ بعيداً عن السطحِ الصلب.

ولا يكادُ يستغرقُ ذلكَ إلاَّ ثوانٍ معدودات، وسرعانَ ما يبدأُ المركزُ بالتحركِ سريعاً نحو الخارج. أمّا الغلافُ فإنه لا يملكُ، في الوقتِ ذاتِه، ما يكفي مِن الوقتِ للتفاعلِ مع هذا التطورِ السريع، فلا يُصابُ إلاَّ بأثرٍ مخفَّفٍ مِن المركزِ المتحركِ نحو الخارج (انظر الشكلَيْن ٣,١٢ و٣,١٣). وبلغةِ الفيزياويِّ، فإننا نقولُ بأنَّ موجةَ صدمةٍ shock wave قد تحررت مِن هذه العملية.

وليست موجةُ الصدمةِ هذهِ إلاَّ السطحَ المتحركَ للاضطراب، والذي يوجدُ عَبْرَهُ فرقٌ عظيمٌ في الضغط. وبينما يتغيّرُ الضغطُ عَبْرَ الوسطِ بنعومةٍ، في العملياتِ الفيزياويةِ الطبيعية، فإنه يهوي في العمليةِ المتفجرةِ عبر السطحِ بحدَّةٍ. إنَّ هذا التغيّرَ المتقطعَ يسوقُ السطحَ بقوةٍ عظيمةٍ نحو منطقةِ الضغطِ المنخفض. وهذهِ هي موجةُ الصدمةِ التي تتحررُ في أيةِ عمليةٍ متفجّرة.

وهكذا فإنَّ موجةَ الصدمةِ تسببُ تَمَزُّقَ الغلافِ النجميِّ شَرَّ مُمَزَّقٍ، مُطايِرَةً إياهُ إلىٰ الخارجِ سِراعاً. **وهذه هي المرحلةُ التي يُقال فيها عن النجمِ بأنه ينفجرُ، عندما يصبحُ مستسعِراً أعظم supernova.**

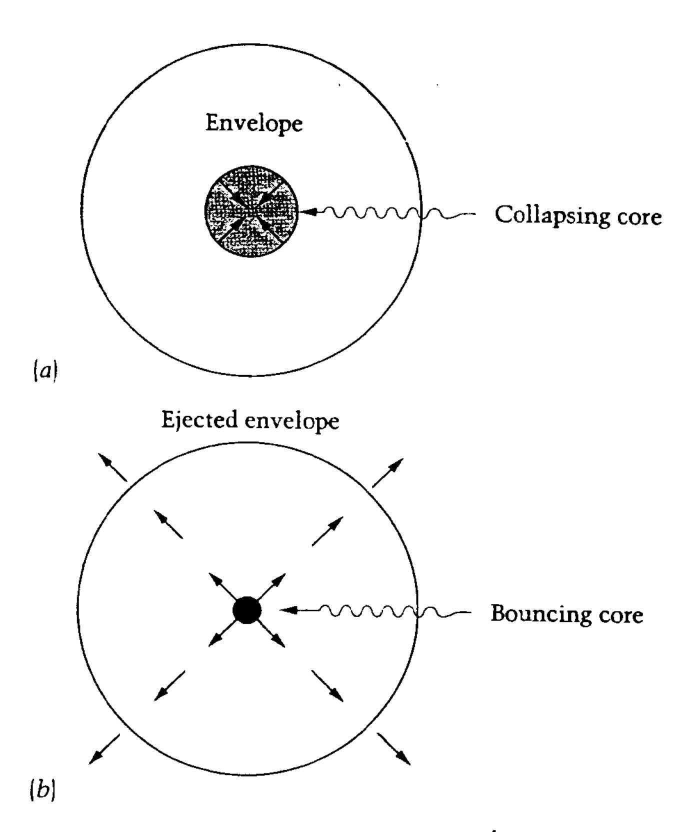
= احتمالَ أن تكونَ للنيوترينو كتلةٌ ضئيلة، وهكذا فإنه قد يُبطِئُ مِن سرعته ويصيرُ له موقعٌ للسكونِ أيضاً. ولكنَّ هذه الفرضيةَ لم يتمَّ التأكدُ منها بالتجربةِ بَعْدُ، ولذا فلسوفَ نفترضُ هنا بأنّ النيوترينواتِ ترتحلُ دائماً بسرعةِ الضوء. أمّا ضِدُّ النيوترينو فهو جسيمٌ مشابهٌ، ولكنه مصنوعٌ مِن ضدِّ المادة antimatter. إنَّ المادةَ وضدَّ المادةِ يُفني بعضُها بعضاً، ويَنتجُ عن ذلك الإشعاعُ، وهكذا فإنّ النيوترينو وضِدَّ النيوترينو يفنيان.



الشكل ٣,١٢: نرىٰ هنا كيف أنَّ موجةَ الصدمةِ، المتولدةَ في المناطقِ الداخليةِ مِن النجم الذي هو علىٰ وشكِ الانفجار، تسيرُ خارجاً، مؤديةً إلىٰ تسخينِ الطبقاتِ الخارجيةِ مِن النجم، وإلىٰ إطلاقِ تفجُّراتٍ مِن الاندماجِ النوويِّ هناك.

وقبل أن نناقشَ آثارَ الانفجارِ التي هي غايةٌ في الإثارة، علينا أن لا ننسىٰ **نذيراً** بحدوثِ الانفجار، قبل لحظاتٍ معدوداتٍ مِن حدوثه. ونعني بذلكَ النيوترينواتِ neutrinos التي تتكوّنُ عندما تتحوَّلُ، فجأةً، مادةُ المركزِ إلىٰ عددٍ كبيرٍ مِن النيوترونات neutrons.

وتخرجُ النيوترينواتُ سائرةً خارج النجم بسرعةِ الضوء. وتتميزُ النيوترينواتُ بأنها تخرجُ، عَبْرَ النجم كلّهِ، سالمةً عملياً، لأنها لَا تتفاعلُ مع أيِّ شكلٍ مِن أشكالِ المادةِ إلاَّ بصورةٍ ضعيفةٍ جداً. وبعبارةٍ أخرىٰ، فإنَّ المادةَ الموجودةَ في طريقها لا تشكِّلُ بالنسبة إليها أيَّ عائق. وهو ما يحدثُ لجسيماتِ الضوءِ الهاربةِ، أو الفوتوناتِ photons. وهكذا فإنَّ لدينا نتيجةً مشهودةً تتمثلُ في **أنَّ النجمَ يُرسِلُ، قبلَ انفجارهِ، بِدفقٍ كبيرٍ مِن النيوترينواتِ المنتَجَةِ في مركزه.**



الشكل ٣,١٣: يتحركُ مركزُ النجم، في (a) إلىٰ الداخلِ بسرعةٍ، بينما هو يتحركُ بسرعةٍ إلىٰ الخارجِ، في (b). إنَّ المخططَ الفيزياويَّ سريعَ التحوُّلِ، ما بينَ المركزِ والغلافِ، يُحرِّرُ موجةَ صدمةٍ تؤدي إلىٰ لَفْظِ الغلافِ خارجاً.

آثارُ الكارثة

إنَّ موجةَ الصدمةِ المتولدةَ في السطحِ البينيِّ، بينَ مركزِ النجم وغلافِهِ، تُمزّقُ الأخيرَ، فيلفظُ هذا معظمَ كتلتهِ إلىٰ الفضاءِ ما بَيْنَ النجوم. ولكنْ، وقبلَ حدوثِ ذلك، ولفترةٍ لا تتعدىٰ عَشَراتٍ قليلةً مِن الثواني، فإنَّ الصدمةَ الخارجةَ تُسَخِّنُ الأجزاءَ الخارجيةَ مِن الغلاف.

ولمّا كان النجمُ، قبلَ حدوثِ هذه الجائحةِ، قد اكتسب بِنْيَةَ «أوراقِ البصلِ» (انظر الشكل ٣,١٠)، مع طبقاتٍ للنَوىٰ تصيرُ أخفَّ وأخفَّ كلما ابتدعنا عن القلبِ المركزيِّ أكثرَ فأكثر، فإنَّ هذه الطبقاتِ سوف تسخنُ إلىٰ درجاتِ حرارةٍ عاليةٍ جداً تؤدِّي بِنَواها إلىٰ الاندماج. ويوضحُ الشكلُ ٣,١٢ هذه الظاهرة التي تُعرَفُ **بالتخليقِ النوويِّ المتفجِّر**

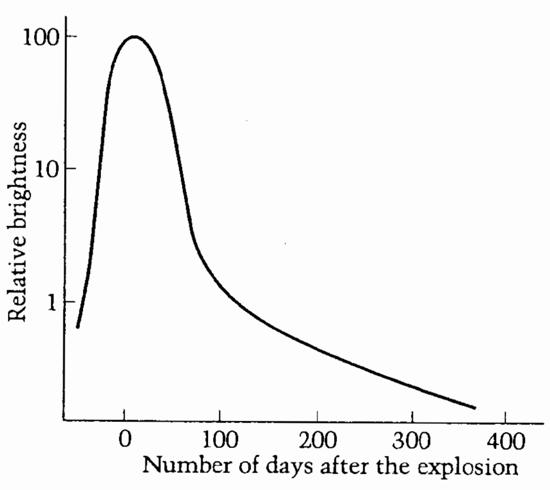
explosive nucleosynthesis، لأنها أشبهُ بانفجارٍ يحدثُ في فترةٍ زمنيةٍ قصيرة. علىٰ أنّ هذه الظاهرةَ يمكنُ أن تكون لها آثارٌ ماتِعَةٌ علىٰ محيط المستسعرِ الأعظم، وكما سنرىٰ في هذا الفصل لاحقاً.

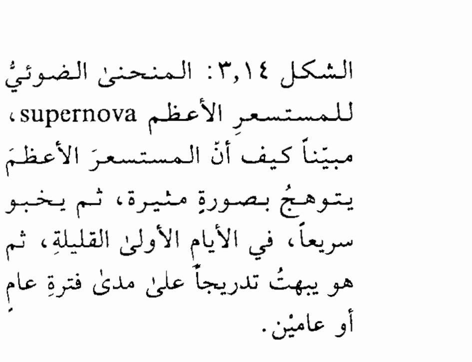
وتَفَجُّرُ النجم ذاتهِ، والذي يطردُ غلافَه إلىٰ الفضاء، هو بالطبع أعنفُ وأقوىٰ بكثيرٍ مِن التركيبِ النوويِّ المتفجّر. وتكونُ الطاقةُ الناتجةُ علىٰ شكلِ إشعاعٍ وجسيماتٍ كالإلكترونات، والبروتونات، والنيوترونات، ونوىٰ الذرات. ولِهُنَيْهَةٍ عابرةٍ مِن المجدِ قبل أن يموتَ، يولِّدُ النجمُ كميةً عظيمةً مِن الطاقةِ تفوقُ ما تشعّهُ المجرّةُ التي يقعُ فيها كلُّها مجتمعةً، وهي مجرّةٌ قد تحوي ما يزيدُ علىٰ أكثرِ مِن **مائةِ بليونِ نجم**. فلا عجَبَ أنْ قد رأىٰ الصينيونَ النجمَ الضيفَ في ضوءِ النهار.

ويمكنُ للعلماءِ أن يحسبوا كيف يزدادُ سطوعُ النجم بِحِدَّةٍ، ثم هو ينخفضُ بثبات. ويُظهِرُ الشكلُ ٣,١٤ منحنىٰ ضوءٍ نموذجياً لمستسعرٍ أعظَم. ونلاحظُ هنا كيف أنه يرتفعُ وينخفضُ بحدّةٍ في فترةِ أيامٍ قلائلَ، ثم إنه يهبطُ بثباتٍ لفترةٍ تزيدُ علىٰ السنة. وهكذا، فإنّ النجمَ يصيرُ غيرَ مرئيٍّ بالعينِ المجردة. إنّ «الضيفَ» يكونُ قد شَدَّ رِحالَهُ وغادرَ، حينئذٍ.

الملعقةُ في يدك

فلنتفكرْ قليلاً في أمرٍ يُواجهنا في كلِّ يوم، أمرِ الملاعقِ المعدنية التي نستخدمُها لتناولِ الطعامِ. فمِن أين تجيءُ المادةُ التي تُصنَعُ منها؟




الشكل ٣,١٤: المنحنىٰ الضوئيُّ للمستسعرِ الأعظم supernova، مبيّناً كيف أنّ المستسعرَ الأعظَمَ يتوهجُ بصورةٍ مثيرة، ثم يخبو سريعاً، في الأيام الأولىٰ القليلةِ، ثم هو يبهتُ تدريجاً علىٰ مدىٰ فترةِ عامٍ أو عامَيْن.

إنَّ الملعقةَ الفولاذيةَ التي لا تصدأُ قد عُمِلَتْ في مصنعٍ ما، وقد قامَ المصنعُ بدورِهِ بالحصولِ علىٰ المادةِ الأساسية، وهي الفولاذُ (الصُّلْب) steel، مِن مصنعِ حديدٍ وفولاذ، ثم لا بدَّ أنَّ المصنعَ قامَ بتصنيعِ الفولاذ مِن المعدنِ الخامِ المستخرَجِ مِن المنجم. ويمثِّلُ المنجمُ الحديدَ المترسِّبَ في الأرض. وهذا ما قد يدعو الإنسان للقولِ بأنَّ الأرضَ هي المصدر.

ولكنّ ذلك ليس بالجوابِ النهائيِّ، فلسوف نتساءلُ عن كيفيةِ وصولِ الحديدِ إلىٰ الأرض. وقد يكمنُ الجوابُ في أنه كان موجوداً في الفضاء، في المادة ما بين النجوم، والتي تكوَّنت الأرضُ منها. ولكن ما الذي جاءَ بالحديد، في هذه الحالةِ، إلىٰ ما بينَ النجوم[1]؟

وهاهنا يجيءُ دورُ المستسعرِ الأعظم، فهو يُلقي، عند انفجارِهِ، بالحديدِ المصنوعِ داخلَه إلىٰ الفضاءِ المحيط به ما بين النجوم. لقد تمّ صنعُ الحديدِ في ذلك النجمِ، وفي درجة حرارةٍ كان مقدارُها بلايينَ الدرجات.

وهكذا يتوجّبُ عليك أن تتذكّرَ، وأنتَ تُبَرِّدُ بالملعقةِ مِن درجةِ حرارةِ الشايِ الذي تشربُهُ، درجاتِ الحرارةِ العاليةَ التي جاءت مِن خلالها المادةُ التي صُنِعَت منها تلك الملعقة!

الأشعةُ الكونية Cosmic rays

إنّ الجسيماتِ والنّوىٰ التي يقذفها المستسعرُ الأعظمُ تخرجُ منه بطاقةٍ عاليةٍ جداً، حتىٰ أنَّ معظمَها يسيرُ بسُرَعٍ قريبةٍ جدّاً مِن سُرعة الضوء. ولكن، أين هي تذهبُ؟ إنها يمكنُها أن ترتحلَ، حالَ خروجها مِن وَسَطِ النجمِ الساخنِ والمضطرب، عَبْرَ المجرةِ كلها. ولكنَّ أيَّ حقلٍ مغناطيسيٍّ في طريقها قد يحرِفُ مِن مسارِها. وهكذا، فلو استلَمْنا دفقاً مِن هذه الجسيماتِ، فليسَ بمقدورِنا التأكّدُ إن كان مصدرُها يقعُ بالاتجاهِ الذي تقتربُ به منّا في مجرّتنا، أم لا. ومِثْلُ هذهِ الجسيماتِ تمطرُنا بوابلها مِن كلِّ الاتجاهات، وهي تُعْرَفُ **بالأشعةِ الكونية cosmic rays**. وكان أوّلُ اكتشافٍ للأشعةِ

---

(١) وهكذا فلقد أثبتَ العلمُ الحديثُ ما جاءَ في كتابِ اللّهِ قبلَ أكثر مِن أربعة عشر قرناً، مِن أنّ حديدَ الأرضِ إنما أنزلَهُ رَبُّ السماء، وخالِقُ كلِّ شيءٍ، مِن السماءِ، مُعجزةً باهرةً تنطُقُ بتنزيلِ ربِّ العالَمين: ﴿. . وأنزلنا الحديد فيه بأس شديد ومنافع للناس. .﴾ [الحديد: ٢٥] ﴿أم خلقوا من غير شيءٍ أم هم الخالقون﴾ [الطور: ٣٥] صدق اللّه العظيم. د.س

الكونية في نهاية القرنِ التاسع عشر وبداية القرنِ العشرين. فلقد لاحظَ الفيزياويونَ أنّ كشّافاتهم الكهربائية electroscopes، وهي أدواتٌ تختزنُ الشِّحنة الكهربائية، تنحو إلىٰ تفريغ نفسِها حتىٰ تحت حمايةِ الدروعِ الرصاصيةِ السميكة. ولم يكنْ ذلك بالأمرِ الممكنِ إلاّ إذا كان التفريغُ قد أُجرِيَ بقذفِ جسيماتٍ، مِن الخارج، ذاتِ شِحنةٍ معاكسةٍ وسريعة الحركة، وهي تبلغُ حدّاً مِن القوةِ يمكّنُها مِن اختراقِ الدرع الرصاصيّ. ولقد حدَسَ العالِمُ الفيزياويُّ سي.تي.ر.ويلسون، بأنَّ هذه الجسيماتِ قد تكونُ قادمةً مِن خارج الأرض، رغمَ أنَّ أكثرَ الفيزياويينَ اعتقدوا بأنها تأتي من الصخورِ البِلَّوْريةِ الأرضية.

ولو كان رأيُ الأغلبيةِ صواباً، لتوجّبَ أن تخفَّ شدَّةُ تدفّقِ هذه الجسيماتِ كلما ابتعدْنا عن سطحِ الأرض. ولقد قام الفيزياويُّ السويسريُّ ألبرت غوكيل، في عام ١٩١٠، بالصعودِ في منطادٍ علىٰ ارتفاعِ ٤٠٠٠ مِترٍ تقريباً، فوجَدَ أنَّ شدَّةَ التدفّقِ قد بقيت علىٰ حالها مِن دونِ أن تخفّ. ثم قامَ ڤيكتور فرانز، عامَ ١٩١٢، بالصعودِ إلىٰ ما هو أعلىٰ مِن ذلك، وإلىٰ ارتفاعٍ يقربُ مِن ٥٠٠٠ مِترٍ، فوجدَ أنَّ شدَّةَ التدفّقِ قد **زادت**. ولقد تمّ في السنينِ التالية، مِن خِلالِ البلوغ إلىٰ ارتفاعاتٍ أكبرَ مِن ذلك، التأكدُ مِن زيادةِ التدفقِ كلَّما ارتفعْنا عن سطح الأرض، وصار مِن الواضحِ أنَّ حدسَ ويلسون كانَ في محلِّه، فتمّمْ صياغةُ اسم «الأشعة الكونية». وتحتوي هذه الأشعةُ علىٰ جسيماتٍ كالإلكتروناتِ، والبروتوناتِ، والنيوتروناتِ، ونَوىٰ الذرّات، كما أنها قد تحتوي علىٰ كمياتٍ صغيرةٍ مِن ضدِّ المادة antimatter.

ومِن أين تجيءُ هذه الجسيماتُ، ذاتُ الحركةِ السريعةِ، والتي تُقْذَفُ الأرضُ بها قذفاً في كلِّ حينٍ؟ إنَّ المصدرَ المحتملَ لها، وكما قد رأينا، هو المستسعراتُ الأعظم. وتسير المقذوفاتُ النجميةُ، في سيناريو ما بعدَ الانفجار، في كلِّ حَدْبٍ وصوب، ويتخذُ بعضُها سبيلَه إلينا. وقد يتساءلُ المرءُ أحياناً عمّا كان يمكنُ أن يحدثَ لنا لو كنّا قريبينَ بما يكفي مِن المستسعرِ الأعظمِ حتىٰ نستلمَ دَفقاً كبيراً مِن الأشعةِ الكونية.

وليس هذا السيناريو بالشيءِ السّار، فلو كان جَرَيانُ الأشعةِ الكونيةِ مرتفعاً جداً، فإنّ الجسيماتِ القادمةَ سوف تدمّرُ طبقةَ الأوزونِ في الغلافِ الجويِّ المحيطِ بالأرض. ويتسببُ ذلك في وصولِ كمياتٍ كبيرةٍ مِن الأشعةِ فوق البنفسجيةِ مِن الشمسِ تكفي لمحوِ الحياةِ مِن علىٰ سطحِ الأرض. وكم يتوجّبُ أن يكونَ قُرْبُ المستسعرِ الأعظمِ منّا، حتىٰ يتحققَ مِثْلُ هذا الاحتمالِ المروِّع؟ والجوابُ هو: أقرب مِن ٣٠ سنةٍ ضوئية، لمستسعرٍ أعظمَ تبلغُ قوّتُه كقوةِ ذلك الموجودِ في سديمِ السرطان. ولحُسنِ الحظِّ، فإنّ سديمَ

السرطانِ يبعدُ عنا بمقدارِ ٢٠٠ ضعفٍ عن تلك المسافة! ثُمَّ إنه ليسَ ثمّةَ نجومٌ عملاقةٌ كثيرةٌ يمكنُها أن تصبحَ مستسعراتٍ عُظمىٰ، ضمنَ هذه المسافةِ الحرجةِ، ولكنْ مَن يدري. . . ؟

ولكنْ، تخيَّلْ أن مستسعراً أعظمَ قد انفجرَ علىٰ بُعْدِ ٣٠ سنةٍ ضوئيةٍ عنا. إنَّ ضوءَهُ يستغرقُ ٣٠ عاماً للوصولِ إلينا. فعندما نرىٰ ذلك الحدثَ هنا علىٰ الأرضِ، فإنَّ ذلك يكونُ قد حدثَ قبل ذلك بثلاثينَ عاماً. وماذا عن دَفقِ الأشعةِ الكونية؟ إنَّ جُسيماتِ الأشعةِ الكونيةِ تسيرُ بسرعةٍ تقربُ مِن سرعةِ الضوء، ولكنها قد لا تسيرُ إلينا بصورةٍ مباشرة. إنَّ حقلاً مغناطيسياً في المجرّةِ قد يؤخرُ مِن وصولها إلىٰ الأرضِ بضعَ سنين. ولسوف يتوجبُ علىٰ سكانِ الأرضِ أن يَجِدوا إجراءاتٍ مضادّةً مِن نوعٍ ما، ضدَّ الفاجعةِ القادمةِ خلالَ فترةِ «الإمهالِ» هذه.

المستسعرُ الأعظم 1987 A

رغمَ أنَّ المستسعراتِ العظمىٰ المرئيةَ في مجرتِنا نادرةٌ نسبياً، فإننا نرىٰ مستسعراتٍ عظمىٰ تتفجّرُ في المجراتِ الأخرىٰ، وعلىٰ نحوٍ منتظم. وكما ذكرنا سابقاً، فإنّ المستسعراتِ العظمىٰ التي تُشاهَدُ في كلِّ سنةٍ تُعَرَّفُ بحسبِ تسلسلِها الزمنيِّ، وبنظامِ الألفِ باء. ولْنُلْقِ نظرةً علىٰ بعضِ تفاصيلِ مستسعرٍ أعظمَ شوهدَ في عام ١٩٨٧، فلمّا كان أولَ مستسعرٍ أعظمَ يُرىٰ في ذلك العام، فلقد تمَّ تصنيفُه تحت اسمِ 1987 A، وأمّا الظروفُ التي أدّت إلىٰ اكتشافه فهي كالآتي:

حَدَثَ أن لاحظَ أيان شيلتن، مِن جامعةِ تورنتو، وهو فلكيٌّ مقيمٌ في مَرْصَدِ لاس كامباناس في تشيلي، وجودَ نجمٍ ازدادَ توهجُهُ حديثاً، باتجاهِ سحابةِ ماجِلاّنَ الكبرىٰ Large Magellanic Cloud (LMC). قامَ شيلتن بالتقاطِ صورةٍ للنجم، وكان ذلكَ أولَ توثيقٍ لمستسعرٍ أعظمَ جديدٍ شَغَلَ الفلكيينَ، في العالَمِ كلّه، بالمزيدِ مِن الدراساتِ لهذا الشيءِ المثير. ذلكَ لأنَّ صورةَ شيلتن قد بَدَتْ، عندَ مقارنتها بصورةِ النجمِ في اليومِ السابق، ٢٣ مِن شباط ١٩٨٧، أكثرَ توهّجاً، وبكثيرٍ جداً. وكما أثبتَت الحساباتُ التي أجريتْ فيما بعد، فلقد بلغَ التوهجُ الذي وصلَهُ المستسعرُ الأعظمُ نحواً مِن ٥٪ مِن ضياءِ **كلِّ النجومِ الموجودةِ في سحابةِ ماجِلاّنَ الكبرىٰ، مجموعةً إلىٰ بعضها البعض!**

والسحابةُ الأخيرةُ هي إحدىٰ سحابتيْنِ شاهَدَهما فرديناند ماجلان Ferdinand Magellan، مستكشِفُ القرنِ السادسِ عشر، في رِحلةٍ قادَتْهُ إلىٰ نصفِ الكرةِ الأرضيةِ

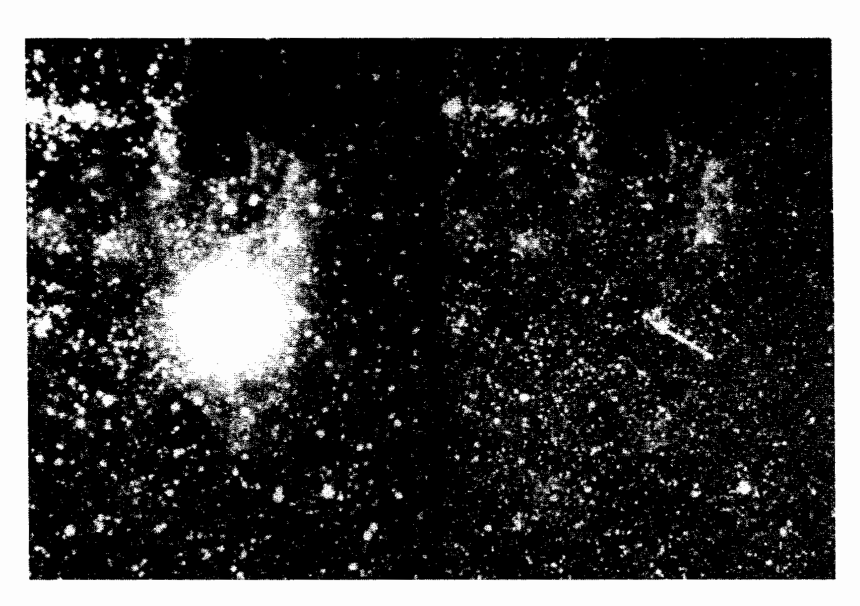
الجنوبيِّ. إنّ سحابتيّ ماجِلاّنَ الكبرىٰ والصغرىٰ هما، في الحقيقةِ، مجرّاتٌ صغيرةٌ غيرُ منتظمةٍ، ويُنْظَرُ إليها علىٰ أنها تابعةٌ لمجرةِ دربِ التبّانةِ Milky Way.

ورغمَ أنَّ رؤيةَ شيلتنَ للمستسعرِ الأعظم شكّلتْ أولَ نبأٍ عن مستسعرٍ أعظمَ يتفجرُ في سحابةِ ماجلانَ الكبرىٰ، فإنها لم تكن أولَ رسالةٍ لتلكَ الظاهرةِ، تصِلُ الأرضَ. ولسوف نعودُ إلىٰ هذه الملاحظةِ المُلَغَّزَةِ بعد قليل.

وقد انتهىٰ الأمرُ، بهذا المستسعرِ الأعظمِ، حتىٰ صارَ في جوانبَ عديدةٍ منه، أرضاً خصبةً لاختبارِ النظرياتِ الفيزياويةِ النجمية.

كان ساندوليك Sandoleak، وهو النجمُ الذي انفجرَ، واسمهُ المفهرسُ هو catalogue name sk-69202، نجماً أزرقَ فوقَ عِملاقٍ supergiant، وتبلغُ درجةُ الحرارةِ علىٰ سطحهِ 20000 K، وإضاءتُه أربعونَ ألفَ مرّةٍ بقدرِ إضاءةِ الشمس (انظرْ الشكل ٣,١٥). ولقد قُدِّرَ نصفُ قطرهِ بخمسةَ عشرَ ضعفاً لنصف قطرِ الشمس، وبكتلةٍ بلغت عند تكوّنه ١٧ ضعفَ كتلتِها.

ولقد أمكنَ تقدير هذه التفاصيلِ لأن هذا المستسعرَ كان، ولحسنِ الحظِّ، علىٰ عتبةِ



الشكل ٣,١٥: لقد انفجرَ النجمُ ساندوليك Sanduleak (الذي نراهُ إلىٰ اليمين) كمستسعرٍ أعظم (ونراه في اليسار)، عن المرصدِ الأنكلو ـ أستراليّ.

مجرتنا. فلقد كان يبعدُ عنا بمسافةٍ معتدلةٍ نسبياً مِن حوالىٰ ١٧٠٠٠ سنةٍ ضوئية، وكان يمكنُ رؤيتُه بسهولةٍ نسبية.

ويقدّرُ علماءُ الفيزياءِ النجميةِ أنَّ تقلّصَ مركزِ النجم الذي أشعلَ شرارةَ الانفجارِ قد حدثَ قبل ساعاتٍ قلائلَ مِن الانفجار. ولو كان في إمكانِنا أن نشهدَ ذلك الحدثَ، لَكانَ في الساعةِ ٠٧,٣٥ مِن التوقيتِ العام Universal Time[1]، في ٢٣ مِن شباط، عام ١٩٨٧. ورغمَ أننا لا يمكننا «النظرُ» إلىٰ داخلِ أيِّ نجم، فلقد كان ثَمَّةَ وسيلةٌ أخرىٰ للحصول علىٰ المعلومات. لقد كان هناك **تدفقٌ كبيرٌ مِن النيوترينوات في وقتِ انهيارِ (تقلّصِ) مركزِ النجم**.

وكما شاء الحظُّ، فلقد كان هناك مختبَرانِ قاما بنصبِ «أفخاخ»، أو كاشفاتٍ، للنيوترينو، وكان أحدُهما في كاميوكاندي في اليابان، والآخرُ، وهو يُعرَفُ باسمِ IMB، في الولاياتِ المتحدة. وقامَ كلٌّ منهما بالكشفِ عن عشرةِ نيوترينواتٍ، قبلَ ساعاتٍ قلائلَ مِن رؤيةِ الانفجارِ بالعينِ المجرّدة. ولقد كان ذلك هو ما توقعناهُ تماماً. ولكنَّ أهميةَ هذا الكشفِ لم تُقَدَّرْ حقَّ قدْرِها إلاَّ بعد حينٍ، عندما أُعلِنَ عن رؤيةِ المستسعرِ بالعينِ المجردة.

وكانت تتمُّ، بالطبع، مراقبةُ المستسعرِ 1987 A، بصرياً، مِن خلالِ العدسات، مِن قِبَلِ مَراصدَ عديدةٍ، وازدادَ انبعاثُه الضوئيُّ بصورةٍ سريعةٍ، وفي يوم واحدٍ، ألفَ ضعفٍ عمّا كان عليه النجمُ الأصليّ. وازداد كذلك حجمُه نصفُ القطريِّ مِن ١٥ نصفَ قطرٍ شمسيٍّ إلىٰ ما يعادلُ حجمَ مَسارِ المريخ. كان ذلك عندما أصبحَ مستسعراً أعظم supernova. وعندما اكتشفَهُ شيلتن بصرياً، فلقد كان مرَّ علىٰ انهيارِ مركزِه ٢٢ ساعة.

وبعضُ النَّوىٰ التي تتحررُ في المستسعرِ الأعظم يَنْحَلُّ، مِن خلالِ النشاطِ الإشعاعيّ. وتتضمنُ نواتجُ الانحلالِ أشعةَ غاما، ذاتَ الطاقةِ العالية. وليس كلُّ أشعةِ غاما يهربُ مِن دونِ فُقدانٍ للطاقة، إذ إنّ قسماً منها يفعلُ ذلك، ولقد تمَّ الكشفُ عن ذلك، في أولِ الأمر، مِن قِبَلِ القمرِ الصناعيِّ سولار ماكس Solar Max، ثم مِن خلالِ تجاربِ المناطيد. ولقد كان ذلكَ تأكيداً إضافياً لنظريةِ انفجار المستسعرِ الأعظم.

وقد انخفضت الإضاءةُ الكليةُ للمستسعرِ الأعظم، ما بينَ صيفِ عام ١٩٨٧

---

(١) التوقيتُ العام هو الساعةُ التي يستخدمُها الفلكيونَ في إنحاء العالَم لتسجيلِ الأحداث. إنها توقيتُ غرينتج ذاتُه Greenwich Mean Time المستخدمُ مِنْ قَبْلُ، ولكن مع تصحيحاتٍ تقنيةٍ قليلة.

و١٩٨٨، والناجمةُ عن فقدانِ أشعةِ غاما لطاقتها على شكلِ ضوءٍ مرئيٍّ وأشعةٍ تحت حمراء. وكانت الفترةُ المميِّزةُ لهذا الانحلالِ حوالى ١١٤ يوماً. ولقد أعطانا معدَّلُ حدوثِ الانحلالِ هذا، والمعلوماتُ الأخرى، تأكيداً ثميناً لنظرياتِ التخليقِ النوويِّ النجمي stellar nucleosynthesis.

وهكذا، فلقد بَيَّنَ ظهورُ المستسعرِ الأعظمِ 1987 A، كيف يمكنُ للفلكيينَ في العصورِ الحديثةِ، ومِن خلالِ تأكيداتٍ عديدةٍ مختلفةٍ، أن يختبروا نظرياتِهم ويحسِّنوا منها.

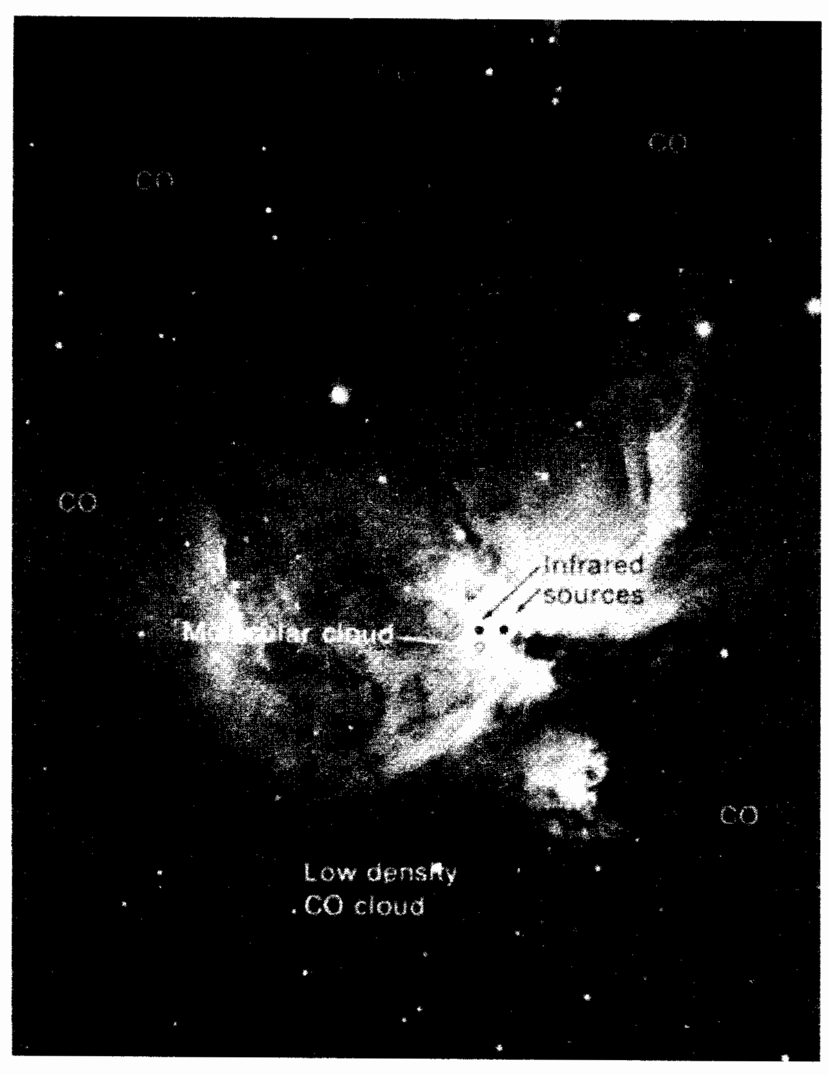
في نهايتي بدايتي! In my end is my begining

يمكنُ أن نُطلقَ الوصفَ المذكورَ في هذا العنوانِ على موتِ النجم. ولقد وصفْنا في الفصلِ الثاني الأفكارَ السائدةَ عن كيفيةِ ظهورِ النجم، وإشعاعهِ للطاقة. كيف يولدُ النجم؟ إنَّ فهمَنا الحاليَّ لهذه الظاهرة، وباختصارٍ، هو الآتي: إننا نَصِفُ موتَ النجمِ هنا لأنه يمكنُ أن يأذنَ، وبشكلٍ غريب، بولادةِ جيلٍ جديدٍ مِن النجوم.

وتوجدُ في الفضاءِ الفسيح ما بينَ النجومِ سُحُبٌ كثيفةٌ مِن الغاز، وهذهِ السُّحبُ منتشرةٌ وداكنةٌ بالضرورة، ولكنَّ علمَ الفلكِ المبنيَّ على الأشعةِ تحت الحمراءِ والموجاتِ الدقيقةِ (المايكرو ويف)، قد يَسَّرَ لنا مِن معرفةِ تركيبةِ هذهِ السُّحب. ويُرينا الشكل ٣,١٦ سديمَ أوريون Orion Nebula، والذي يُمكِنُ مشاهدَتُه، بالطبع، مِن خلالِ مِرْقابٍ أيِّ هاوٍ. وتُنارُ الأقسامُ المتوهجةُ مِن السديمِ مِن قِبَلِ النجومِ الموجودةِ في السحابة.

ولكنها تحتوي على أكثر مِمّا تراهُ العينُ، وهو ما نراه في الشكل. ذلكَ لأنَّ دراسةَ الفلك، بالأشعةِ تحتَ الحمراءِ، قد أظهرتْ لنا جيوباً تَصْدُرُ منها انبعاثاتٌ قويةٌ للأشعةِ تحتِ الحمراء. ثم إنَّ الدراساتِ الفلكيةَ بالأشعةِ الدقيقة أو أشعةِ موجةِ المليمتر قد بيَّنَتْ وجودَ جزيئاتٍ لمركَّبِ أولِ أوكسيد الكاربون. ولقد جاءَ اكتشافُ الجزيئاتِ الكيمياويةِ، في القرنِ العشرين، مُفاجئاً للفلكيين، إذ كان أكثرُهم يعتقدُ بأنّ الفضاءَ ما بينَ النجومِ لا يحتوي إلاّ على عناصرَ بسيطةٍ، كالكاربونِ مثلاً. ولكنْ ما يهمُّنا هنا هو أمرُ الأشعةِ تحتِ الحمراء، إذ تُنبئُنا نظريةُ تكوُّنِ النجومِ بأنَّ انبعاثاتِ الأشعة تحتِ الحمراء تَصْدُرُ مِن النجومِ المتكوِّنةِ حديثاً.

ويُعتقَدُ، في واقعِ الحال، أنّ النجومَ تتكوّنُ مِن سُحُبٍ كبيرةٍ مِن الجزيئات، في

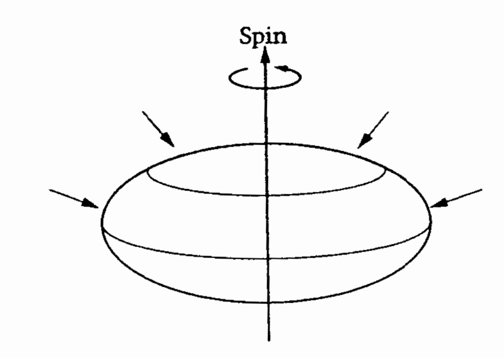


الشكل ٣,١٦: سحابةُ أوريون Orion Nebula، وتَظهرُ فيها الأجزاءُ التي توجدُ فيها جزيئاتُ أولِ أوكسيد الكاربون، وأماكنُ وجودِ مصادرِ الأشعةِ تحتِ الحمراء (عن مَراصدِ مؤسسة كارنيجي في واشنطن).

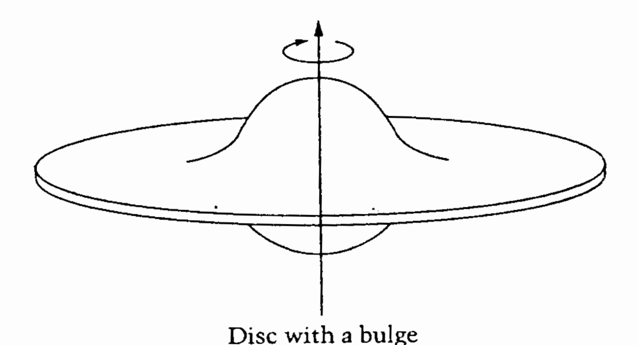
الأقسامِ الأكثرِ كثافةً منها. ويُعتقَدُ أنَّ تلك الأقسامَ سوف تتقلّصُ بسببِ شَدِّها الجاذبيِّ الأكبرِ نحو الداخل. وتصيرُ مِثلُ هذه الأجزاءِ كُراتٍ تأخذُ في التقلّصِ المستمر، وتزدادُ السخونةُ في داخلها شيئاً فشيئاً. وتُعَرفُ هذهِ النجومُ **بالنجومِ الأولية proto - stars**، وهي تصيرُ نجوماً حقيقيةً عندما تَسْخُنُ مراكزُها بما يكفي لِقَدْحِ زِنادِ التفاعلِ الاندماجيِّ النوويِّ

فيها. وحتىٰ ذلك الحينِ، فإنّ تلكَ النجومَ الساخنةَ نسبياً تتكوّنُ إشعاعاتُها في الأساسِ، مِن أطوالِ الموجةِ تحت الحمراء.

ويتصورُ هذا السيناريو أيضاً تكوينَ الكواكبِ السيارةِ مع تكوّنِ النجوم. وإذا ما كان ذلك الجزءُ مِن السحابةِ الغازية التي تصيرُ نجماً يلفُّ حولَ نفسِه، فإنَّ المنطقةَ الاستوائيةَ منهُ سوف تتمددُ وتصيرُ قرصاً كبيراً يحيطُ ببروزٍ وسطيٍّ، وكما يبدو في الشكل ٣,١٧. ويُعتقَدُ بأنَّ الجزءَ المركزيَّ يصيرُ نجماً، بينما تتكوَّنُ الكواكبُ السَّيارةُ بعد تشتتِ أجزاءِ القرص. ولمّا كان القرصُ يلفُّ حولَ البروزِ الوسطيِّ، فإنّ الكواكبَ السيارةَ تدورُ حول النجمِ المركزيّ. وقد اكتسبتْ هذه الفكرةُ دفعاً، في عام ١٩٨٣، عندما اكتشفَ القمرُ الصناعيُّ الفلكيُّ للأشعةِ تحتِ الحمراء «إيراس» Infrared Astronomy Satellite [IRAS]، أقراصاً كهذه لنجومٍ أوليةٍ حولَ نجومٍ قليلة (الشكل ٣,١٨).



Contracting cloud



Disc with a bulge

الشكل ٣,١٧: إنَّ السحابةَ المتقلصةَ، والتي تلفُّ حولَ نفسِها، تنتشرُ إلىٰ الخارجِ علىٰ شكلِ قرصٍ يُحيطُ ببروزٍ وسطيّ. ويستمرُّ هذا البروزُ في تكوّنه حتىٰ يصيرَ نجماً، بينما يتجزأُ القرصُ إلىٰ كواكبَ سيارةٍ.



الشكل ٣,١٨: صورةٌ لإيراسَ للقرصِ الموجودِ حولَ النجمِ بيتا ـ پكتورِس - Beta Pictoris، عن ناسا.

وهكذا، فإنَّ سحابةَ كسديم أوريون إنما هي دارُ حَضانةٍ نجميةٌ عملاقة، وهي واحدةٌ مِن بين العديدِ مِن أمثالِها في المجرة. وهكذا تستمرُ عمليةُ تخليقِ النجوم، جنباً إلىٰ جنبٍ، مع نشوءِ وموتِ النجومِ العجوزة. ولكنَّ السؤالَ الذي أقلقَ علماءَ فيزياءِ النجوم هو هذا: هل يُمكنُ لقوةِ جاذبيةِ الجزءِ الكثيفِ مِن سحابةٍ جزيئيةٍ عملاقةٍ أن تبدأَ عمليةَ التقلصِ بذاتِها، ومِن غيرِ مساعدة؟ إنَّ قوةَ الجاذبيةِ ليست قويةً بما يكفي، في المراحلِ الأولىٰ، وعندما تكونُ السحابةُ منتشرةً جدّاً.

علىٰ أننا قد صارَ بإمكانِنا الآنَ أن نُجيبَ علىٰ هذا السؤال. **إنَّ تخليقَ النجومِ الجديدةِ مِن السُحُبِ ما بينَ النجوم، يمكنُ أن يُساعَدَ عليه، أو حتىٰ تسبيبِه، بانفجارِ مستسعرٍ أعظمَ قريبٍ.** ولسوف نَصِفُ نوعيْنِ اثنينِ مِن الدلائلِ التي تعزِّزُ هذه الفكرة.

لقد جاءت أولُ عَيِّنَةٍ مِن الدليل مِن نيزكٍ سقطَ عام ١٩٦٩ علىٰ قريةٍ مكسيكيةٍ تُدعىٰ بِنبيليتو دي اللندي. ولقد أظهرَ هذا النيزكُ الذي يُعرَفُ بنيزكِ الليندي خصوصياتٍ معيّنةً في تركيبِه النوويِّ (الشكل ٣,١٩). إنَّ هذه الخصوصياتِ التي تُعْرَفُ **بالشذوذاتِ النظيرية isotopic anomalies** هي التي تزوّدُنا بمفاتيحَ مهمّةٍ حولَ أصلِ منظومتِنا الشمسيةِ الخارجية.



الشكل ٣,١٩: نيزكُ الليندي Allende meteorite.

إنّ **النظائرَ isotopes** المختلفةَ للعنصرِ تحتوي على نَوىً تحملُ العددَ ذاتَه مِن البروتوناتِ، ولكنها تحملُ أعداداً مختلفةً من النيوترونات. فمعدنُ الألمنيوم، مثلاً، الذي تُصنَعُ منه الأواني والمَقالي (جَمْعُ مِقلاة)، هو ذلك المعدنُ المستقرُّ الذي يحتوي في نواته على ١٣ بروتوناً و١٤ نيوتروناً، وهو يُكتَبُ على شكلِ ^{27}Al، وللألمنيوم نظيرٌ غيرُ مستقرٍّ يُدعى ^{26}Al، لأنه يحتوي على ١٣ بروتوناً و١٣ نيوتروناً. ولأنّ الخصائصَ الكيمياويةَ للعنصرِ يحدّدُها عددُ الجسيماتِ **المشحونةِ** في النواة، فإنّ كلاًّ مِن ^{27}Al و^{26}Al يمتلكانِ الخصائصَ الكيمياويةَ ذاتَها، ولكنَّ خصائصَها النوويةَ مختلفة.

إنَّ ^{26}Al غيرَ المستقرِّ هو مادةٌ ذاتُ نشاطٍ إشعاعيّ، ويبلغُ «نصفُ حياتِه» ٧٢٠٠٠٠ سنةٍ. أي أننا إذا كان لدينا مخزونٌ مِن ١٠٠ نواةٍ مِن ^{26}Al، فلسوف ينحَلُّ نصفُها (٥٠)، في المعدّلِ، بوساطةِ النشاطِ الإشعاعيِّ في هذه الفترة. والناتجُ الرئيسيُّ عن الانحلالِ الإشعاعيِّ هو نظيرٌ مُشِعٌّ لعنصرٍ آخرَ هو المغنيسيوم، ورمزُه ^{26}Ag. وتحتوي نواةُ المغنيسيوم هذا على ١٢ بروتوناً و١٤ نيوتروناً. وهكذا، فلقد تمَّ تغييرُ أحد البروتوناتِ الموجودةِ في نواةِ المغنيسيوم الأصليةِ إلى نيوترون. وبالإضافة إلى ذلك يتحرّرُ أيضاً بوزيترونٌ (e^+) positron ونيوترينو (v) neutrino.

وأبرزُ مظاهرِ نيزكِ الليندي هو احتواؤهُ علىٰ نظائرَ معيَّنةٍ بِنِسَبٍ تختلفُ تماماً عن تلك الموجودةِ، في الأحوالِ الطبيعيةِ، في مكوّناتِ المنظومةِ الشمسية. وتُعرَفُ هذه الفروقاتُ الموجودةُ بكثرةٍ **بالشذوذاتِ النظرية**. ولقد وُجِدَتْ نسبةٌ عاليةٌ، وبصورةٍ شاذّةٍ، مِن ^{26}Mg، في نيزكِ الليندي، فلماذا يحدثُ ذلك؟

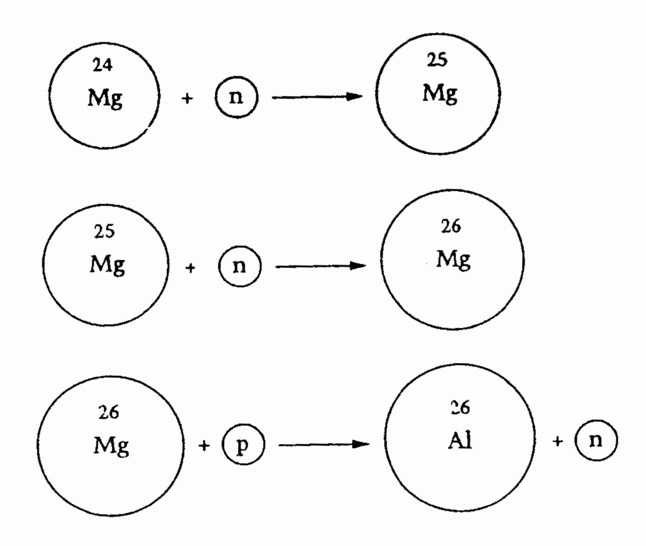
قد يمكنُنا أن نفهمَ هذا السؤالَ وجوابَه بصورةٍ أفضلَ لو ضربْنا مَثَلاً لذلك. افرضْ أنَّ دولةً ما قد فرضتْ قوانينَ تسيطرُ بها علىٰ الذهب، ولا يحقُّ للمواطنينَ بموجبها أن يحوزوا علىٰ الذهبِ الخالصِ فوقَ حصّةٍ محدّدة. وإذا ما أظهرَ تحقيقٌ سريعٌ، لشريحةٍ مِن المجتمعِ، شخصاً يمتلكُ كميةً مِن الذهبِ تفوقُ تلك الحصةَ بكثيرٍ، فلسوف يثورُ السؤالُ: كيفَ اكتسبَ ذلك الشخصُ تلك الكميةَ الكبيرةَ مِن الذهب؟ وقد تقودُ التحرياتُ، في نهايةِ المطافِ، إلىٰ الكشفِ عن أنّه قد هرّبَ الذهبَ مِن بلدٍ آخرَ، حيثُ هو متوفرٌ ومبذولٌ فيه. وكذلكَ كان السؤالُ الذي سألهُ علماءُ فيزياءِ النجومِ، عن نيزكِ الليندي، هو التالي: أين وكيف اكتسبَ هذا النيزكُ ذلك المخزونَ الكبيرَ وغيرَ السَّويِّ مِن المغنيسيوم ٢٦؟ لقد كانت تحقيقاتُ هؤلاءِ العلماءِ، والتي نصفُها أدناهُ، ليست بأقلَّ إثارةً مِن اكتشافِ مصادرِ السلعِ المهرّبة.

ورغمَ أنَّ هناك عملياتٍ عديدةً يمكنُ، أساساً، أن تصنعَ الكميةَ الإضافيةَ مِن المغنيسيوم ٢٦ ^{26}Mg، إلاّ أنّ المفتاحَ إلىٰ الجوابِ الصحيحِ تمَّ الاهتداءُ إليه عندما تمَّ تحليلُ محتوياتِ الحُبيباتِ المعدنيةِ للنيزكِ بعناية. ولقد وجدَ العلماءُ حينئذٍ أنَّ وفرةَ ^{26}Mg تتناسبُ مع وفرة ^{27}Al، وهو ما يوحي بوجودِ صلةٍ ما بين المغنيسيوم والألمنيوم. وكما رأينا، فإنّ الصلةَ تكمنُ في ^{26}Al، الذي يتحلّلُ إلىٰ ^{26}Mg.

وهكذا فلقد استنتجَ العلماءُ أنَّ هناك أحدَ أمريْنِ: إمّا أنّ ^{26}Al دخلَ مادةَ النيزكِ بطريقةٍ ما ثمَّ انحلَّ هناك، علىٰ مدىٰ فترةِ ٧٢٠٠٠٠ سنةٍ أو ما يقرُبُ مِن ذلك، أو أنّ النيزكَ كان مصنوعاً مِن مادّةٍ ما بينَ النجومِ تحتوي علىٰ ^{26}Mg المتكونِ مِن تحلّلِ ^{26}Al الموجودِ في الوسط. ويبدو السيناريو الأخيرُ أكثرَ معقوليةً، ولكنه ينطوي بداهةً علىٰ أنَّ النيزكَ قد تكوّنَ **مباشرةً بعد** تلوّثِ الوسطِ ما بينَ النجومِ بـ ^{26}Mg، وإلاّ لَكانَ المَخْضُ المستمرُّ للوسطِ ما بينَ النجوم بوساطةِ العملياتِ الكونيةِ قد أزالَ بصمةَ أيِّ تلوّثٍ **قديم**. وهكذا استنتجَ العلماءُ بأنّ تكوينَ النيزكِ لا بدَّ أنّه حدثَ بعد ترسّبِ وانحلالِ ^{26}Al في الوسطِ ما بين النجوم. وما عساهُ أن يكونَ ذلك الحدثُ الكونيُّ الذي رَسَّبَ نظيرَ الألمنيوم هذا، في الفضاءِ ما بين النجوم (البَيْنَجْمِيّ).

إنَّ هذا لَهُوَ أوانُ المستسعرِ الأعظم. لاحظْ، أولاً، أنَّ السُلَّمَ الترابيَّ للنَوىٰ التي تصيرُ أكبرَ وأكبر، والتي وصفناها سابقاً علىٰ أنّها تتكونُ في تفاعلاتِ اندماجيةٍ متعاقبة، تزيدُ مِن عددِ الجسيماتِ في النواة بأربعِ درجاتٍ، وهكذا يكون لدينا ^{12}C، ^{16}O، ^{20}Ne، ^{24}Mg، وهَلُمَّ جَرّا. وأما الألمنيوم ^{26}Al، فإنهُ لا يصلحُ لهذهِ المتواليةِ، ولكنْ يمكنُ أن نجعلَه كذلكَ مِن خلالِ طورِ التركيبةِ النوويَّةِ المتفجّرةِ للمستسعرِ الأعظمِ التي وصفناها سابقاً. ويمكنُ في هذا الطورِ إضافةُ النيوتروناتِ (n) والبروتوناتِ (p) الحُرّةِ لتكوينِ النَّوىٰ خارجَ سُلَّمِ جُسيمةِ ألفا، إذ يمكنُ مثلاً تكوينُ ^{26}Al مِن ^{24}Mg، مِن خلالِ سلسلةٍ مِن التفاعلاتِ الموضحةِ في الشكل ٣,٢٠. وهناك طُرُقٌ أخرىٰ لصنعِ ^{26}Al، في هذا الطَّوْرِ مِن حياةِ المستسعرِ الأعظم. إنَّ هذه المقذوفاتِ الناتجةَ عن الانفجارِ يمكنُ أن تلوِّثَ، وبسهولةٍ، الفضاءَ البَيْنَجميَّ القريب.

واقترحَ العلماءُ أنّ الشذوذاتِ النظيريةَ لنيزكِ الليندي، كتلك التي تحدثُ للمغنيسيوم ^{26}Mg، والتي ناقشْناها سابقاً، قد نجمتْ عن انفجارِ مستسعرٍ أعظمَ قريبٍ مِن السحابةِ الغازيّةِ التي تكوّنت منها المنظومةُ الشمسيةُ. إنّ تكوينَ المستسعرِ الأعظمِ لا يمكنُ أن يكونَ أقدمَ بكثيرٍ مِن تكوُّنِ المنظومةِ الشمسية. وعلىٰ سبيلِ المثال، فلو كانت الفجوةُ



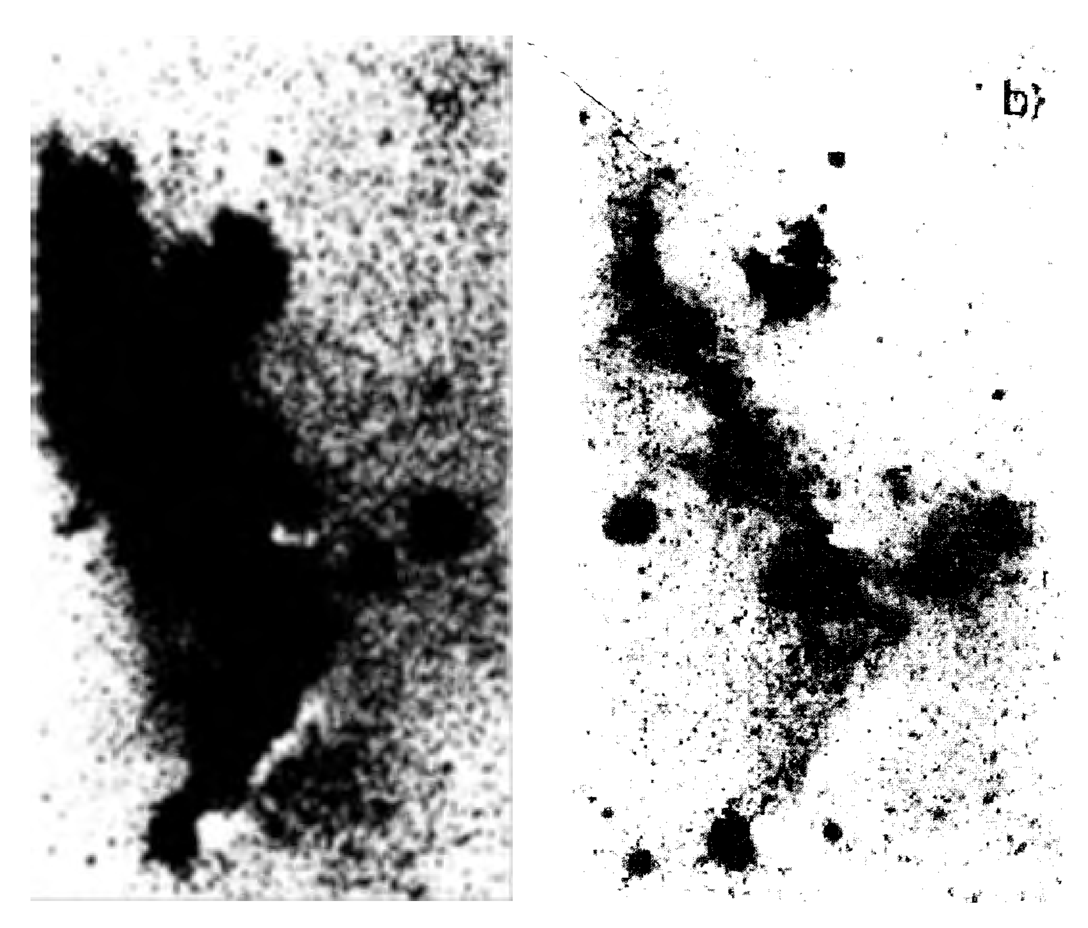
الشكل ٣,٢٠: مخططٌ يبينُ كيف يمكنُ تَكَوّنُ نظيرِ الألمنيوم ^{26}Al، مِن النظيرِ ^{24}Mg، علىٰ سُلَّمِ جسيمةِ ألفا، بإضافةِ نيوتروناتٍ وبروتون.

الزمنيةُ ما بين انفجار المستعرِ الأعظم وتكوينِ المنظومةِ الشمسيةِ مليونَ سنةٍ أو أكثر، فإذاً لَمُسِحَتْ بَصَماتُ تَلَوُّثِ المستعرِ الأعظمِ كلُّها.

وهكذا فإنَّ هذا الدليلَ مِن نيزكِ الليندي، لَهُوَ صِلَةُ الوصلِ ما بين أصلِ منظومتِنا الشمسيةِ وبين مستعرٍ أعظمَ حديثٍ نسبياً. ومن الممكنِ أنَّ وجودَ المستعرِ الأعظمِ قريباً مِن المنظومةِ الشمسيةِ كان مُجَرَّدَ مصادفةٍ، وكذلك توقيتُ انفجارِه قبل أن يبدأَ تكوينُ المنظومةِ الشمسيةِ مباشرة. ولكنْ لَمّا كانتِ المستعراتُ العظمىٰ أموراً نادرة نسبياً، فقد يكونُ وراءَ هذا الأمرِ أكثرُ مِمّا قد يبدو للعينِ في الوهلةِ الأولىٰ. وفي واقعِ الحالِ، فإنَّ هناك حُجَّةً تقترحُ بأنّ انفجارَ المستعرِ الأعظمِ قد أشعلَ فتيلَ عمليةِ تكوينِ النجومِ القريبةِ منه. فلننظرْ في هذه الحُجّة، بِوَجازَةٍ، قَبْلَ أن نفحصَ الجزءَ الثانيَ مِن الدليل.

نحن نتذكَّرُ بأنّ انفجارَ النجم قد نجمَ عن موجةِ صدمةٍ عملاقةٍ ابتدأتْ في قلبِ النجمِ وارتحلتْ خارجَهُ. إنّ هذه الموجةَ لا تنتهي عند سطحِ النجم، ولكنها تستمرُّ علىٰ الحركَةِ إلىٰ الخارج، وبينما هي تنحسرُ عن مركزِ الانفجارِ، فإنَّ شدَّتَها تضعفُ بالطبع. ولكنها، وفي جوارِ النجم مباشرةً قد تبقىٰ عنيفةً جداً. وهذه الموجةُ المرتطمةُ بالسحابةِ البَيْنَجْميةِ قد تُكسِبُها دفعاً قوياً. وهذا الدفعُ هو المطلوبُ بالضبطِ لإحداثِ انضغاطٍ في السحابة، وهو يحلُّ الإشكالَ الذي ذكرْناهُ مِن قَبْلُ، مِن أنّ الجاذبيةَ هي أضعَفُ، في بدايةِ الأمرِ، مِن أن تُبدِئَ انضغاطاً لسحابةٍ منتشرةٍ كبيرة. وهل نمتلكُ أيَّ دليلٍ علىٰ وجودِ أمثالِ موجةِ الصدمةِ هذه قريباً مِن النجومِ المتكونةِ حديثاً؟ والجوابُ هو نعم! ولقد قامَ فلكيّانِ بالكشفِ عن مثلِ هذا الدليلِ، عامَ ١٩٧٧، وهما ويليم هربست وجورج أسّونا.

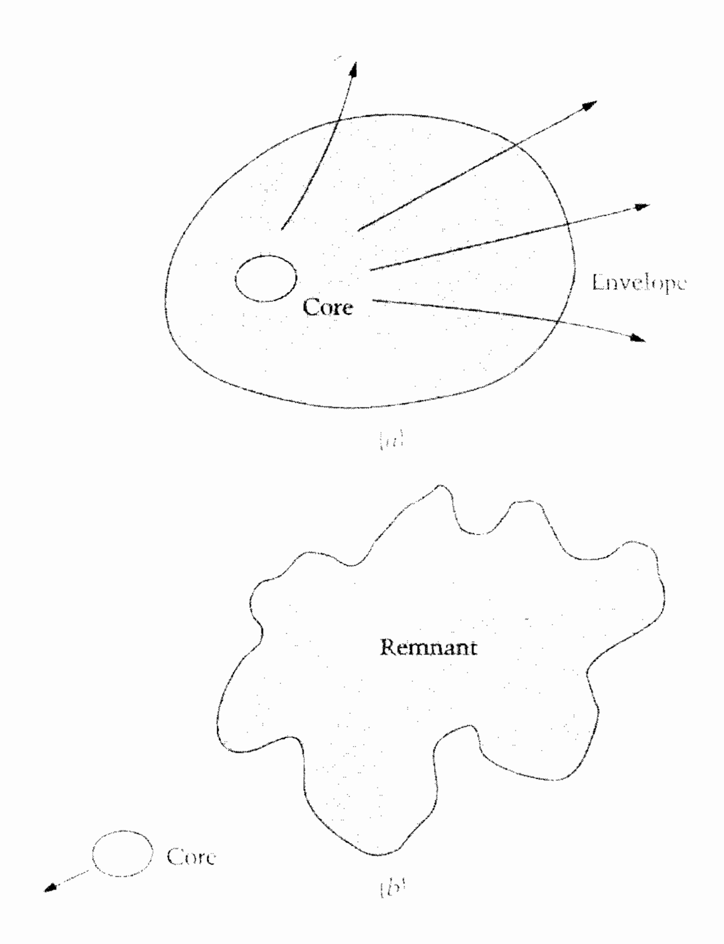
قام هربست وأسّونا بفحصِ الشيءِ الفلكيِّ المسمىٰ بالكلبِ الأكبرِ Canis Majoris R-1، عن قُرْبٍ. إنَّ بقيّةَ هذا المستعرِ الأعظم، التي نراها في الشكل ٣,٢١، تشبهُ سديمَ السَّرَطانِ الذي يظهرُ في الشكل ٣,١. وكما في السَّرَطانِ، فإنَّ هناك دلالةً علىٰ حركةٍ لجسيماتِ الغازِ نحو الخارج، مُشيرةً إلىٰ حدوثِ انفجارٍ سابق. وتدلُّ التقديراتُ المبنيةُ علىٰ هذهِ الحركاتِ علىٰ أنَّ الانفجارَ قد حدثَ قبل الحالةِ التي نراها الآنَ في الكلبِ الأكبر بحوالىٰ ٨٠٠٠٠٠ سنة. وما هو أكثرُ إثارةً مِن ذلك أنْ قد تَمَّ رصدُ نجومٍ فيما قَبْلَ التابعِ الرئيسيِّ pre-main-sequence، في موقعٍ لا يبعدُ كثيراً عن بقيةِ المستعرِ الأعظم. وهذهِ النجومُ، التي يُعتَقَدُ بأنَّ أعمارَها لا تتجاوزُ الـ ٣٠٠٠٠٠ سنةٍ تقريباً، قد



الشكل ٣,٢١: بقايا المستسعرِ الأعظمِ للكلبِ الأكبر Canis Majoris R-1. ولدينا في (أ) الطبعةُ الحمراء، وفي (ب) الطبعةُ الزرقاء.

تكونُ النجومَ الأصغرَ مِن بينِ كلٍّ ما قد عرفَه الفلكيون. إنّها لم تصلْ بَعْدُ طورَ النجومِ البالغةِ تماماً، إذ إنها لم تَقْدَحْ زِنادَ التفاعلاتِ النووية في مراكزِها بَعْدُ.

ومِن الواضحِ أنّ هذه النجومَ قد تكونتْ **بعدَ** الانفجار. وكم كانت قوّةُ الانفجار؟ إذا حاولْنا أن نُبْحِرَ إلىٰ الخلفِ، مِن ملاحظاتِنا الحاليةِ لحركةِ الغازِ نحو الخارجِ، فإننا نتوصلُ إلىٰ رقمٍ للطاقةِ المتحررةِ في الانفجارِ يُعادلُ الطاقةَ التي تشعُّها الشمسُ في قوتِها الحاليةِ، ولفترةٍ يبلغُ مِقدارُها ثمانيةَ بلايين مِن السنين! ورغم ما يبدو مِن خياليّةِ هذا الرقم، في الأحوالِ النجميةِ الاعتياديةِ، فإنه خصيصةٌ مميزةٌ للطاقةِ في انفجارِ المستسعرِ الأعظَم.



الشكل ٣,٢٢: يظهرُ انفجارٌ غيرُ متماثِلٍ skew explosion لمستسعرٍ أعظمَ، في (أ). إنه يقذِفُ بالغلافِ باتجاهٍ واحد، بينما يرتدُّ المركزُ إلىٰ الاتجاهِ المعاكِسِ، كنَطْحَةِ البندقيةِ بعد الرَّمية. ويظهرُ هذا في (ب).

وبالنسبةِ إلى النجمِ المنفجر، فإننا لَنتوقعُ أيضاً مؤشِّراً علىٰ شكلِ الجزءِ الباقي، أي علىٰ لُبِّهِ الداخليّ. نحن نرىٰ نجماً حقّاً، ولكنْ ليس داخلَ بقيةِ المستسعرِ الأعظم، وإنما خارجَه. وإننا لَنرىٰ مِثْلَ هذا النجمِ وهو يتحركُ بعيداً عن الجزءِ المتبقي منهُ، وبسرعةٍ غيرِ اعتيادية. هل يمكنُ أن يكونَ هذا هو النجمُ الذي قُذِفَ غلافُهُ عند انفجارِ المستسعرِ الأعظم؟ يمكنُ أن نجدَ تفسيراً معقولاً لمثلِ هذا المنحنىٰ، في المثالِ الذي ضربْناهُ برَمْيَةِ البندقية، فكما أنّ البندقيةَ ترتَدُّ عند إطلاقِ الرمية، فكذلك يرتدُّ النجمُ المقصودُ بعد قذفهِ

لغلافهِ بالاتجاهِ المعاكس. ويُظهِرُ الشكلُ ٣,٢٢ كيفيةَ تولُّدِ سرعةِ الارتدادِ العاليةِ في انفجارِ مستطيلٍ غيرِ مُنْتَظَرٍ. إنَّ سرعةَ النجمِ المَقيسَةَ تُوافقُ فرضيةَ الارتداد.

وهكذا فإنَّ ثمَّةَ دلالةً تدلُّ علىٰ وجودِ صلةٍ بين تكوُّنِ النجوم الجديدة وبين الانفجار الحديثِ للمستسعرِ الأعظم، وهي تعطي قوّةً أكبرَ لفرضيةِ أنَّ تكوينَ النجومِ يتمُّ حَثُّهُ، عموماً، بانفجاراتِ نجومِ الأجيال السابقة. وهكذا فإنَّ روايتَنا لحياةِ النجمِ دارتْ دورةً كاملةً، بالوصلِ ما بين تدميرِ نجمٍ ما وولادةِ غيره!

ولكنَّ شطبَ النجمِ، في هذه المرحلةِ، لهوَ أمرٌ سابقٌ علىٰ أوانه، ذلكَ لأنَّ هناك المزيدَ في حياتهِ، حتىٰ بعدَ التدميرِ الظاهريِّ في انفجار المستسعرِ الأعظم. وتلك قصّةٌ تقودُنا إلىٰ أعجوبةِ الكونِ التالية.

الأعجوبة (٤)

النوابضُ: ساعاتُ الكونِ

Pulsars: The timekeepers of the cosmos

إشاراتٌ مِن الفضاء

التاريخُ: ٧ آب: ١٩٦٧. المكان: كامبريدج، إنكلترا.

كانت جوسلين بيل، وهي خريجةٌ وطالبةٌ في مرصدِ مولارد الراديويِّ الفلكيِّ التابعِ لمختبرِ كافَنِدِش في جامعةِ كامبريدج، تقومُ بمراجعة بياناتٍ للمعلوماتِ التي قامَ المرصدُ بجمعِها لمراقبةِ تأثيرِ الومضاتِ البَيْكوكبية (ما بين الكواكبِ السيارة) interplanetary scintillation. وأظهرَتِ السجلاتُ إشارةً متموجةً يمكنُ أن تكونَ صادرةً عن مصدرٍ راديويٍّ خاضعٍ للوميضِ باتجاهٍ معاكسٍ للشمس. إنَّ أنموذجاً مِن هذا القبيلِ آتياً بهذا الاتجاهِ لهو شيءٌ بالغُ الغرابة (الشكل ٤,١).

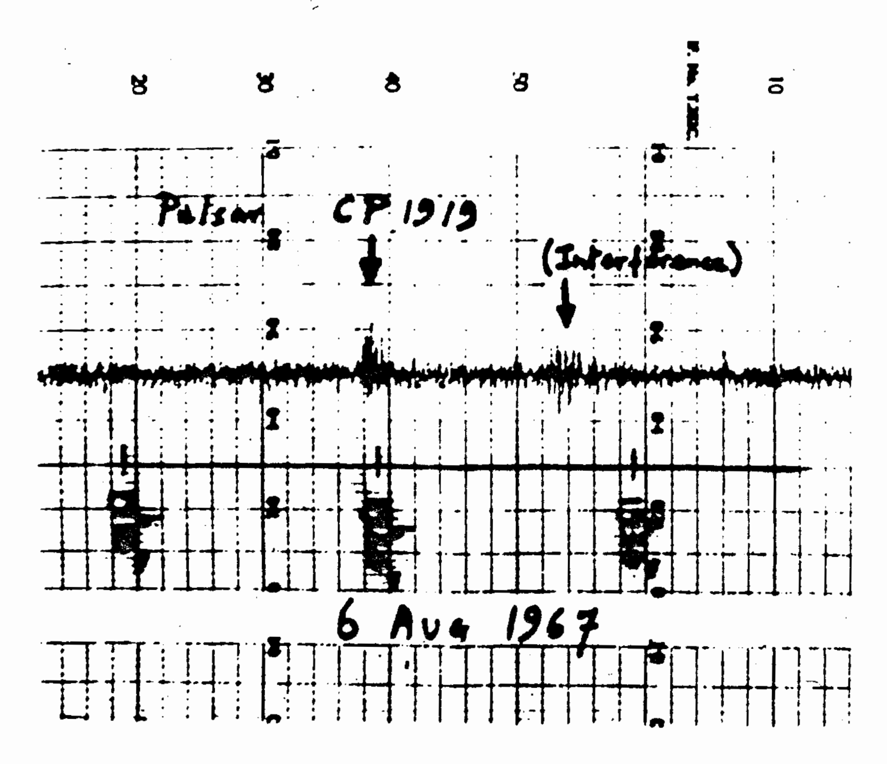
إنّ الوميضَ هو ظاهرةٌ لومضاتِ المصدرِ الراديويِّ، عندما يمرُّ شعاعهُ عَبْرَ سحابةٍ متموجةٍ مِن البلازما. وتوجدُ البلازما plasma، وهي مزيجٌ مِن أيوناتٍ موجبةِ الشحنةِ وإلكتروناتٍ سالبةِ الشحنة، في الفضاءِ البَيْكوكبي. ويكونُ الشكلُ الصاعدُ ـ النازلُ لِشدّةِ المصدرِ بارزاً جداً إذا كان حجمُ المصدرِ صغيراً ظاهرياً، ولذا فإنه يُقابِلُ زاويةً مع راصدٍ مثلِنا تبلغُ ثانيةً قوسيةً واحدة 1 arcsecond (الثانيةُ القوسيةُ هي جزءٌ مِن ٣٦٠٠ جزءٍ مِن الدرجة).

أدركَ أنطوني هويش، في مرصدِ مولارد، إمكانيةَ هذه الطريقةِ المحتمَلةَ في قياسِ الأحجامِ الزاويّةِ للمصادرِ الراديويةِ البالغةِ الصِّغَرِ، فقام بإجراءِ تجربةٍ محكمةٍ لرصدِ

السماءِ بحثاً عن المصادرِ الوامضة، وشارَكَتْهُ جوسلين بيل مشروعه هذا (انظر الشكلين ٤,٢ و٤,٣). وعندما قامت الأخيرة بإخبارِ هويش عن كشفها غيرِ المتوقعِ أدركَ أنَّ الإشاراتِ تحتاجُ إلىٰ مزيدٍ مِن البحثِ عمّا قد تكونُهُ (أو قد لا تكون!).

وهكذا بدأَ هذا برنامجاً معقداً لرصدِ هذه الظاهرة، لمعرفةِ إنْ كانت ناجمةً عن تداخلٍ كهربائيٍّ أو نجمٍ متوهّج. وفي ٢٨ مِن تشرينِ الثاني، وجدَ هويش وبيل أنّ ما كانا ينظرانِ إليهِ إنما هو مصدرٌ نابض pulsating source (انظر في الشكل ٤,٤ نسخةً طِبْقَ الأصلِ، لأولِ إشاراتٍ نابضةٍ تمَّ استلامُها مِن المصدر). وصارَ جليّاً أنّ هناك ظاهرةً فلكيةً لم يُشْهَدْ لها نظيرٌ مِن قَبْلُ.

قام هويش، في ٢٠ شباط من عام ١٩٦٨، بعرضِ نتائجِ تحليلاته الأولية، في منتدىٰ كاڤندِش المكتظّ بالحضور، تحت عنوانِ «اكتشاف نوعٍ جديد مِن مصادرِ الراديو». وإنني لأتذكرُ العديدَ مِنّا، مِمَّنْ ينتمونَ إلىٰ مؤسسةِ علمِ الفلكِ النظريِّ، ومن بينهم



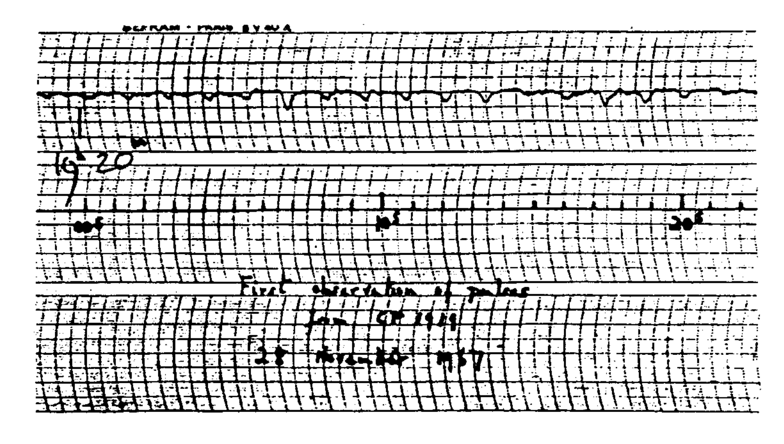
الشكل ٤,١ : أولُ إشارةٍ مِن النابضِ المسمىٰ CP1919 تمّ الكشفُ عنها في ٦ آب مِن عامِ ١٩٦٧، مِن قِبَلِ جوسلين بيل.



الشكل ٤,٢ : جوسلين بيل.



الشكل ٤,٣ : أنطوني هويش.



الشكل ٤,٤ : أولُ نسخةٍ مِن النبضاتِ المستلَمةِ مِن النابض CP_{1919}، في ٢٨ تشرين الثاني ١٩٦٧.

مؤسِسُها فريد هويل، وهم يرتحلونَ لحضورِ تلك المحاضرة. وإذْ كنا نعملُ في شارعِ مادنغلي، علىٰ طولِ مشارفِ كامبريدج الشرقية، فلم نكنْ نحضرُ، في العادةِ، الندواتِ التي كانت تُقامُ في مختبراتِ كافَندش القديمةِ في وسطِ المدينة. ولكنَّ ذلكَ اليومَ كان مختلفاً، فلقد كانت لدينا إلماعَةٌ بأنَّ المتحدثَ سيتكلمُ علىٰ شيءٍ ما ذي طبيعةٍ استثنائية.

وكان هناك، بالتأكيد، جوٌّ مِن التوقّع، ولاحظَ الحضورُ المكتملُ شيئاً غيرَ اعتياديٍّ تَمَثَّلَ في وجودِ مقصوصاتٍ لرجالٍ خُضْرٍ صِغارٍ، علىٰ لوحةِ مسرحِ قاعة ماكسويل المَهيبة! هل سنسمعُ عن إشاراتٍ قادمةٍ مِن مخلوقاتٍ خارجِ أرضيةٍ متطورة؟

لقد سمعْنا فعلاً كلاماً علىٰ إشاراتٍ، إشاراتٍ تَبَيَّنَتْها أولاً جوسلين بيل، ثم اختبرَ صحّةَ أصلِها الخارجِ أرضيِّ مُرشدُها في البحث، هويش، وآخرونَ مِن زملائه، ومِن ضمنهم بيل ذاتُها. كانت الإشاراتُ علىٰ شكلِ نبضاتٍ راديويةٍ غايةٍ في الانتظام، وكما لاحَظَتْ بيل مِن قَبْلُ. كانت فترتُها، أي الزمنُ ما بينَ نبضتيْنِ متتاليتيْنِ، قد قِيسَتْ، فوُجِدَ أنها تبلغُ ١,٣٣٧٣٠١١٥١٢ ثانية. وأنّ يتمكنَ شخصٌ ما أن يتحدثَ عن الفترةِ بدِقّةٍ تبلغُ ١٠ درجاتٍ عشريةٍ لَهُوَ أمرٌ مثير، ولم يسبقْ له مثيلٌ في عالَم المراقبةِ الفلكية. وما عساهُ أن يكونَ مصدرُ هذه النبضاتِ الراديويةِ المنتظمةِ جداً؟

قد يكونُ الاستنتاجُ الذي خرجَ به هويش في ذلك اليوم خَيَّبَ أملَ مُلَمِّعي الخيالِ العلميّ، لأنه لم يكُنْ يَعْتَقِدُ بأنها قد أُرسِلَتْ مِن حضارةٍ عاقلةٍ بالغةِ التطور. ولماذا؟ لأنَّ حضارةً كهذه يتوجبُ أن تكونَ موجودةً علىٰ كوكبٍ سيّارٍ يدورُ حول نجمٍ ما، وليس

علىٰ النجم ذاتهِ (إنَّ النجمَ لَهُوَ أسخنُ بكثيرٍ مِن أنْ تسكنَه مخلوقاتٌ حية!)، وفي حالةٍ كهذهِ، فإنَّ الكوكبَ السيارَ يجبُ أن يكونَ متحركاً نَحونا ثم مبتعداً بالتناوب، وهذا يمكنُ أن يسبِّبَ صعوداً ونزولاً في تردّدِ الومضات[1]. ولكنَّ أثَراً مِن هذا القبيلِ لم تتمَّ مشاهدتُه، وبقيَ الترددُ ثابتاً، وهكذا فلا بُدَّ أن يكونَ المصدرُ شيئاً لا يملكُ مثلَ هذهِ الحركةِ الدائرية.

ماذا يمكنُ أن يكونَ ذلك المصدرُ؟ لَمّا كانت الوَمضاتُ قصيرةً جداً، فلا بُدَّ أنَّ المصدرَ مُدَمَّجٌ (مُتَضامٌّ) جداً، إذ لا يُتوقَّعُ لِمَصْدَرٍ كبيرٍ ومنتشرٍ أن يرسلَ مِثْلَ هذه الوَمضات، لأنَّ أيّةَ تغيراتٍ فيزياويةٍ متماسكةٍ فيهِ لا بدَّ أن يكونَ لها زمنُ إعادةِ «فترة» أطولُ بكثير. وبالنسبةِ إلى المصادرِ المدمجةِ، فإنَّ الأقزامَ البيضَ أو النجومَ النيوترونيةَ هي الاحتمالُ الغالب.

خرجْنا، في ذلك اليومِ، مِن ندوةِ هويش، بشعورٍ مفادهُ أنَّ الفلكيينَ يواجهونَ تحدياً جديداً، ولم يكنِ التفكيرُ، في سيناريو لِظاهرةٍ تملكُ مثلَ ذلكَ الانتظامَ الزمنيَّ، وبفترةٍ قصيرةٍ كتلكَ، سهلاً أبداً.

وأطلقوا اسمَ «النابض» pulsar، علىٰ هذا المصدرِ المثير، للتأكيد علىٰ طبيعتِهِ النابضة، وأُعطيَ الاسمَ المفهرسَ CP 1919، حيثُ تشيرُ الحروفُ إلىٰ نابضِ كامبريدج، والأعدادُ إلىٰ موقعهِ مقيساً بإحداثيٍّ فلكيٍّ هو الزمانُ النجمي[1] sidereal time، وقدره ١٩ ساعة و١٩ دقيقة ($19^h\ 19^m$)، في السماء.

وبعد الإعلانِ عن اكتشافِ كامبريدج مباشرةً، استُخدِمَتِ المَراقِبُ الراديويةُ radiotelescopes، في أريسبو في پورتو ريكو، للبحثِ عن مصادرَ أخرىٰ مشابهةٍ، فوُجِدَ

---

(١) هذهِ ظاهرةُ دوبلَرْ المعروفة Doppler effect، وهي أولُ مَن استكشَفَها، في القرنِ التاسع عشرَ، كريستيان دوبلر، في الموجاتِ الصوتية. ويُسبِّبُ هذا التأثيرُ ارتفاعَ درجةِ النَّغَم، أيْ طبقةَ pitch صوتِ المصدرِ المقترِب، وانخفاضَها للمصدرِ المبتعد. وينطبقُ الأمرُ ذاتُه علىٰ موجاتِ الضوءِ أو الراديو، بارتفاعِ الترددِ أو انخفاضه.

(١) الزمانُ النجميُّ: هو الزمانُ المبنيُّ علىٰ أساسِ اليوم النجمي. و«فترةُ الدوران **النجمية**» **Sideral** period، هي فترةُ الدوران بالنسبة إلى نقطةٍ ثانية خارجية. فلو نظرنا إلى الشمس، مثلاً، **من موقع ثابتٍ، أي من نجم ما**، لاكتشفنا، من خلال متابعتنا لدوران كلفها الشمسي sunspots، أن فترة دورانها النجمي تبلغ ٢٥ يوماً. وهذا يختلفُ عن «فترة الدوران **الاقترانية**» **Synodic** period. وبالنسبة إلى الشمس فإننا نعني بها الفترة التي تحتاجها الشمس حتى تدور حول نفسها مرة واحدة **بالنسبة إلى الأرض**، وهي أطول من الأولى بيومين، إذ هي تبلغ أكثر من ٢٧ يوماً بقليل. د.س

العديدُ منها. ولقد وُجِدَ ما يزيدُ علىٰ ٦٠٠ نابضٍ، حتىٰ الآن. وقد تمَّ تصنيفُ كلٍّ منها بالحروف PSR، التي تشيرُ إلىٰ الحروف الأولىٰ مِن عبارةِ (مصدرٍ نابضٍ في الراديو pulsating source in radio)، يتبعُها رقمانِ موضوعٌ أحدهُما جنبَ الآخرِ، وهما يخبرانِ الفلكيينَ عن موقِعها في السماء.

فلننظُرِ الآن فِيمَ يُعتَبَرُ النابضُ أحدَ أكثرِ الأشياءِ إثارةً في مجرتنا، شيئاً لا يملكُ مظاهرَ مرئيةً مثيرةً وحسب، ولكنه يتطلَّبُ أيضاً تطبيقاتٍ للفيزياء في تُخومِ العلمِ المتقدمة. وقد مُنِحَ هويش جائزةَ نوبل، عامَ ١٩٧٤، لاكتشافه هذا، وهو أنهىٰ محاضرته في حفلِ جائزةِ نوبل بهذه الكلمات:

> إنني آمُلُ، في توضيحي لمَعالِم فيزياء النجوم النيوترونية، ولِحَظِّيَ السعيدِ في العثور عليها بمحضِ المصادفةِ، أنني قَد أعطيتُ فكرةً ما عن أهميةِ ومنافعِ توسيع علم الفيزياءِ إلىٰ ما بعدَ تُخومِ المختبرات. حقّاً إنَّ مِن سعادةِ المرءِ أن يكون فيزياوياً نجميّاً في زمنٍ كهذا...

النجمُ النيوترونيُّ The neutron star

لقد التقينا، في الفصلِ الثاني، بالنجومِ الأقزام، مِن بينِ مُرَشَّحَيْنِ اثنينِ لأن يكونا نابضَيْنِ. ويعودُ الفضلُ في شرحِ طبيعةِ النجمِ القَزمِ الأبيضِ، في منتصفِ ثلاثيناتِ القرن العشرين، إلىٰ بحوثِ ر.هـ. فاولر وشاندراسيكار المبكّرة. ورغمَ أنَّ الشكوكَ حامت حولَ صحّةِ البحثِ الذي قام به شاندراسيكار مِن قِبَلِ خبيرٍ هو أدنغتن ليسَ غيرُ، فإنَّ فكرةَ حدِّ شاندراسيكار صارتْ راسخةً تماماً في خلالِ عقدٍ مِن الزمان أو ما يقربُ مِن ذلك.

وبالأساسِ، وكما وجدْنا في الفصلِ الثاني، فإنّ هذا الحدَّ يُنبئنا بأنْ لا نجمَ تفوقُ كتلتُهُ ذلكَ الحدَّ يمكنُ أن يوجدَ علىٰ شكلِ قزم أبيض. وهذا الحدُّ هو أعلىٰ أربعينَ في المائةِ من كتلةِ الشمس، إذ إننا لا نجدُ، وبالتأكيدِ، أيَّ قزمٍ أبيضَ فوق هذا الحدّ.

ولقد قام شاندراسيكار بحسابِ هذا الحدِّ مِن خلالِ أخذهِ بنظرِ الاعتبارِ سلوكَ المادةِ عندما يتمُّ انضغاطُها إلىٰ كثافةٍ عاليةٍ جداً، وبما يقرُب مِن مليونِ مرةٍ قدرَ كثافةِ الماء. ويُعْتَقَدُ أنَّ كثافةً مِن هذا القبيلِ توجدُ في القزمِ الأبيض. وهكذا، فإنَّ لتراً واحداً مِن مادةِ القزمِ الأبيضِ سوف يحتوي علىٰ كتلةٍ مِن ألفِ طُنٍّ! وتصبحُ إلكتروناتُ المادةِ، في هذهِ الكثافةِ، **مُنْحَلَّةً**. أيَّ أنَّ عددَها في وحدةِ الحجومِ يصيرُ كبيراً جداً، وإلىٰ الدرجةِ التي

تصبحُ فيها بعضُ القواعدِ الأساسيةِ لنظريةِ الكمِّ التي تفرضُ تحديداتٍ علىٰ الانضغاطِ والتَّراصِّ القريبِ للجسيماتِ، منطبقةً.

ويُفتَرَضُ أيضاً، مبدئياً، وجودُ وضعٍ مُشابهٍ لو كان لدينا، بدلاً مِن ذلكَ، انضغاطٌ ورصٌّ شديدٌ للنيوترونات. ولقد رأينا في الفصل السابقِ أنَّ مركزَ المستسعرِ الأعظمِ، وقبلَ انفجارهِ مباشرةً، يَصِلُ إلىٰ تلك الحالة. **وبعدَ تطايُرِ وقذفِ الغلافِ إلىٰ الفضاءِ البينجميِّ، فإنَّ المركزَ يبقىٰ علىٰ قيدِ الحياة بحيثُ تكونُ النيوترونات مكوِّنَه الأساسيّ.** وقد يتذبذبُ المركزُ لفترةٍ قصيرةٍ قبلَ أنْ يستقرَّ علىٰ حالهِ من التوازنِ، عندما يكونُ مؤلفاً أساساً مِن النيوتروناتِ شديدةِ التراصّ.

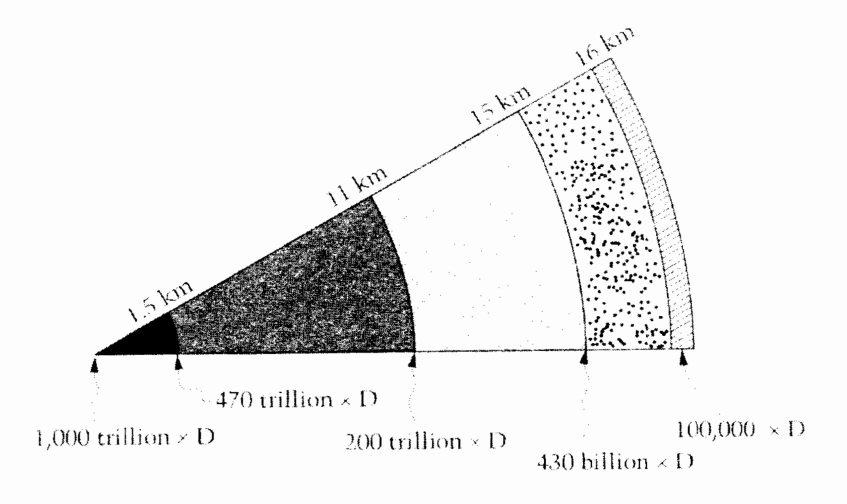
وهكذا هي كيفيةُ ولادةِ **النجم النيوترونيّ neutron star**.

وهاهُنا موقفٌ يشبهُ ذلكَ الذي اكتشفهُ شاندراسيكار بالنسبةِ إلى القزم الأبيض. إذْ إنَّ هناكَ حدّاً لكتلةِ النجم التي يمكنُ أن تسندَها النيوتروناتُ المنحلة. وهذا الحدُّ هو غايةٌ في الوضوحِ، لأنَّ خصائصَ المادةِ الفيزياويةِ، في كثافاتٍ هي **أضعافُ كثافةِ الماءِ بملايينِ البلايينِ مِن المرّات**، لم يتمَّ فهمُها جيداً بَعْدُ. ولكنَّ الخبراءَ يتفقون علىٰ أنَّ حدَّ الكتلةِ هذا هو قريبٌ جداً مِن ضعَفِ كتلةِ الشمس. إنَّ النجومَ ذاتَ الكُتَلِ التي هي دونَ هذا الحدِّ هي وحدَها التي يمكنُها أن تحافظَ علىٰ توازنها علىٰ شكلِ **نجومٍ نيوترونية**.

ويُرينا الشكلُ ٤,٥ صورةً تخطيطيةً لكيفيةِ تكوُّنِ النجم النيوترونيِّ مِن أشكالٍ مختلفةٍ للمادةِ تتراوحُ بين الحالةِ شديدةِ الكثافةِ في المركزِ وحالةِ التخلخلِ الموجودةِ في الطبقاتِ الخارجية. ولكنْ لا بدَّ أن نتذكرَ بأنّ حتىٰ هذه الطبقاتِ الخارجية الأكثرِ تخلخلاً هي أكثرُ كثافةً مِن بعضِ الطبقاتِ الداخليةِ للقزمِ الأبيض! ولنلاحظْ أيضاً بأنّ النجمَ، في الشكل ٤,٥ ، هو أكبرُ كتلةً مِن كتلةِ الشمسِ بـ ٤٠٪، ولكنَّ نصفَ قطرهِ كلَّه لا يتعدّىٰ ١٦ كيلومتراً **فقط** (يبلغُ نصفُ قطرِ الشمسِ ١٧٠٠٠٠ كيلومتر).

كيف يمكنُنا أن نكشفَ، بالفعل، عن وجودِ النجم النيوتروني؟ إنه سيكونُ، وكما ذكَرْنا مِن قَبْلُ، أبهتَ وأكثرَ سخونةً علىٰ سطحهِ مِن أن يَظهرَ في مُخَطَّطِ هـ ـ ر القياسيّ. ولكن، هل توجدُ ثمّةَ أيّةُ سُبُلٍ أخرىٰ للتأكّدِ مِن وجوده، في أيّ مكانٍ بذاتِهِ مِن المجرّة؟

اقترحَ المؤلفُ، مع كلٍّ من فريد هويْل، وجون ويلر، في بحثٍ لهم نُشِرَ في المجلة العلمية «**نيتشر**»، عامَ ١٩٦٤ ، بأنَّ النجمَ النيوترونيَّ قد يمكنُ الكشفُ عنهُ مِن خلالِ ذبذباته. وكما ذكرْنا مِن قبلُ، فإنّ النجمَ يتكونُ مِن مركزِ المستسعرِ الأعظمِ المتقلّصِ،



الشكل ٤,٥ : إسْفِينٌ يُبيِّنُ توزيعَ المادةِ الداخليِّ، وكثافتها، في النجمِ النيوتروني. إنّ D هي كثافةُ الماء. والتريليونُ الواحدُ هو مليون بليون.

ويتذبذبُ هذا المركزُ مِن قَبْلِ أن يستقرَّ علىٰ وضعِه الثابت، ويمكنُ أن تستمرَّ ذبذباتُ النجمِ هذهِ لوقتٍ طويلٍ جداً، بسببِ وجودِ طاقةٍ حركيةٍ هائلةٍ فيه يتوجّبُ التخلّصُ منها. واقترَحْنا أنَّ تلك الطاقةَ يمكنُ أن تُبدِّدَها الموجاتُ الكهرومغناطيسيةُ المتولدةُ قُرْبَ النجم، مِن خلالِ تذبذباتِه. ذلكَ لأننا نتوقعُ وجودَ حقلٍ مغناطيسيٍّ كبيرٍ جداً قريباً مِن النجم، وأنّ هذا سوف يشاركُ في التذبذباتِ ويُنتِجُ موجاتٍ كهرومغناطيسيّةً. وكان طولُ موجةِ الراديو المُبْتعَثَةِ، في حسابنا، طويلاً جداً، إذ بلغَ نحواً مِن ٣٠٠٠مِتر.

ثمَّ قُلنا بأنَّ مِثلَ هذهِ الموجاتِ الطويلة سوف تنعكسُ إلىٰ الخلفِ مِن قِبَلِ أيّةِ سحابةٍ غازيّةٍ تمتلكُ ما يكفي مِن الكثافةِ العاليةِ للجسيماتِ. ولكنَّ الموجاتِ سوف تدفعُ السحابةَ نحو الخارجِ، في أثناءِ عمليةِ الانعكاسِ، علىٰ طولِ امتداداتِ اتجاهِها الأصليِّ قبلَ الانعكاس. وتَظهَرُ الخويطاتُ الموجودةُ في سديمِ السرطانِ متحرِّكةً إلىٰ خارجِ المصدر، وربما يكونُ ذلك بسببِ هذا التأثير.

وكما تمَّ إثباتُه، في نهايةِ المطاف، فإنَّ أجزاء كثيرةً مِن هذا السيناريو كانت صحيحةً فعلاً. وهكذا فإن فرضيةَ وجودِ حقولٍ مغناطيسيةٍ قويةٍ قريبةٍ مِن النجومِ النيوترونية، والمذكورةِ في الصورةِ السابقةِ، قد ثبتَتِ الآنَ صِحّتُها. إنّ نجماً طبيعياً قد يمتلكُ حقلاً مغناطيسياً ضعيفاً، ولكنَّ خطوطَهُ المغناطيسيةَ المارّةَ عَبْرَهُ، عندَ تقلُّصِهِ، تصبحُ مضغوطةً مع المادّةِ النجمية. وتدُلُّ خطوطُ القوةِ شديدةِ التَراصِّ، في العادةِ، علىٰ وجودِ قوةٍ

مغناطيسيةٍ شديدة. وهكذا فإنَّ الانضغاطَ، في المركزِ المتقلصِ الذي سوف يصبحُ نجماً نيوترونياً، قويٌّ جداً، وتنتجُ عن هذا حقولٌ مغناطيسيةٌ يصِلُ ارتفاعُها إلىٰ آلافِ البلايينِ من الغاوْس gauss[1] قربَ سطحِ النجم (وللمقارنةِ، فإنّ الحقلَ المغناطيسيَّ قربَ سطحِ الشمسِ يتراوحُ بين ١ و٢ غاوس فقط).

وكما سوف نرىٰ لاحقاً، فإنَّ مِن المعلوم أنَّ ثَمَّةَ نجماً نيوترونياً داخلَ سديم السَّرَطان. ولكنَّ وجودَهُ لا يُكْشَفُ عنه مِن خلالِ تذبذباته، وكما قد اقترحنا، وإنما مِن خلالِ لَفِّهِ حول نفسه، ذلكَ أنَّ النجمَ النابضَ ليس متذبذباً وإنما هو نجمٌ نيوترونيٌّ يلفُّ حول نفسه بسرعة.

أنموذجُ غولْد للنابض

وَعَوْداً إلىٰ اكتشافِ أنطوني هويش وجوسلين بيل، نقولُ بأنهما قد وجدا نبضاً سريعاً، وكان السؤالُ هو: أيُّ نوعٍ مِن الأشياءِ يمكنُ أن يكون صغيراً بما يكفي حتىٰ يُمكنَ أن يكون مصدراً لهذا النبضِ؟ كان لدىٰ العلماءِ، في عام ١٩٦٨، احتمالانِ اثنانِ ممكِنانِ، القزمُ الأبيضُ والنجمُ النيوترونيُّ، وظهرَتْ نظرياتٌ عديدةٌ مختلفةٌ لتفسيرِ طبيعةِ النوابض. وفي الأيامِ الأولىٰ بعد اكتشافِ النابضِ المسمىٰ بِـ CP، عامَ ١٩١٩، فلقد وُجِدَت نوابضُ أخرىٰ قليلةٌ، وهكذا أدّىٰ ذلك إلىٰ مراجَعاتٍ وتقييداتٍ علىٰ النظرياتِ، ولقد تساقطَ قِسمٌ منها علىٰ جانبيِّ الطريقِ، وكما هو عليه الحالُ في التنافسِ العلميِّ الاعتياديِّ لبقاءِ الأصحِ. وبالخصوصِ، فلقد صارَ مِن الجلِيِّ أنّ القزمَ الأبيضَ يمكنُ استبعادُه، وأنّ النجمَ النيوترونيَّ الأصغرَ حجماً بكثيرٍ هو المصدرُ الأكثرُ احتمالاً. ولقد وُجِدَ، وبالمثل، بأنّ سببَ النبضاتِ pulses ليس هو تذبذباتِ النجمِ، ولكنْ لَفَّهُ السريعَ حول نفسه.

وفي آخرِ المطافِ، فلقد صارَ الأنموذجُ الذي اقترحَهُ تومي غولد، وهو فيزياويٌّ نجميٌّ مِن كورنيل (الشكل ٤,٦)، عامَ ١٩٦٨، أفضلَ النظرياتِ المقدمةِ. ورغمَ أننا لا نزالُ لا نملكُ اليومَ أنموذجاً مفصّلاً جداً للنابضِ، فإنَّ أنموذجَ غولد يُفيدُنا كنقطةٍ بدايةٍ جيدةٍ لأيِّ مُمارَسةٍ أكثرَ تفصيلاً لفهمها. إنَّ ما قد يحدثُ في النجمِ النيوترونيِّ وحولَه يمكنُ فهمُه استناداً إلىٰ سيناريو غولد علىٰ الشكلِ التالي:

---

(١) الغاوس هو وحدةُ الحَثِّ المغناطيسيّ. د.س

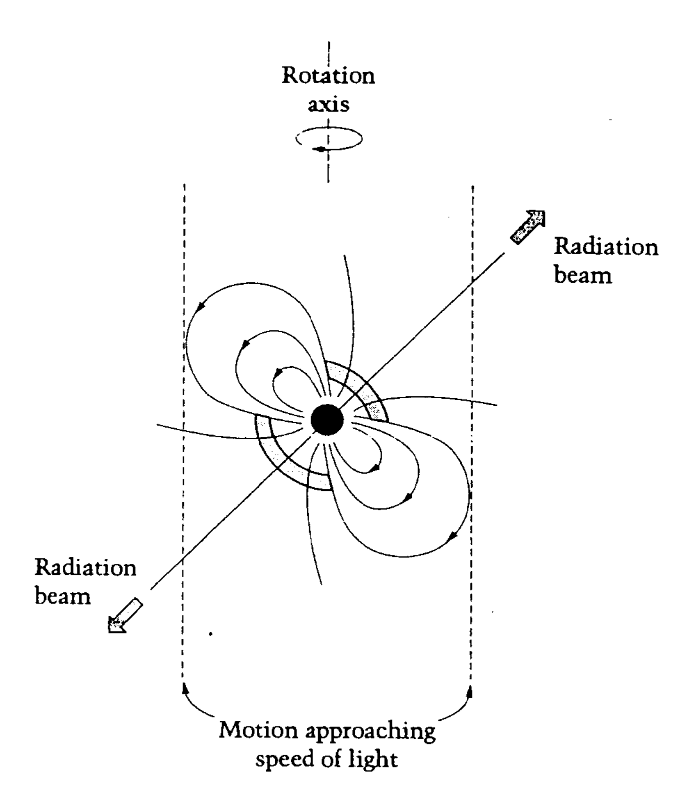


الشكل ٤,٦: تومي غولد
.Tommy Gold

إنَّ للنجم النيوترونيِّ محورينِ قطبييْنِ، وهما مِحْوَرُ الدورانِ ومحورٌ مغناطيسيٌّ. وكذلك فإنَّ لَلأرضِ قطبيْنِ اثنين، ويتكوَّنُ ـ أحدُهما مِن محورِ دورانها، والآخَرُ مِن محورِها المغناطيسيِّ. ولكنْ، وعلىٰ العكسِ مِن الأرضِ، حيثُ يكونُ المحورانِ مصطفَّيْنِ تقريباً، فإنَّ محوريَّ النجمِ النيوترونيِّ النموذجيِّ قد يؤشِّرانِ إلىٰ اتجاهاتٍ مختلفةٍ جداً.

وللنجم الذي يلفُّ حول نفسِهِ حَشْدٌ مندفعٌ مِن الجسيماتِ المشحونةِ كهربائياً (الإلكترونات)، في جوِّهِ. وعندما يلّفُ النجمُ، فإنّ غلافَه يفعلُ الشيءَ ذاته، بفعلِ جاذبيةِ النجمِ القوية. ومثلما أنّ الأجزاءَ الخارجيةَ مِن الدُّوامةِ[1] تتحركُ أسرعَ بكثيرٍ مِن الأجزاءِ الداخليةِ، فإنَّ الجسيماتِ المشحونةَ في الأجزاءِ الخارجيةِ مِن الغلافِ تتحركُ بسرعةٍ بالغة، لا بل هي قد تقتربُ مِن سرعةِ الضوء. ولِنابضٍ يلفُّ حول نفسه مرّةً في كلِّ ثانيةٍ، فإنَّ هذا الحدَّ يمكنُ الوصولُ إليه علىٰ مسافةٍ تَقرُبُ مِن ٥٠٠٠٠ كيلومترٍ مِن محورِ اللّف. ومِن المعروفِ أنَّ هذه الجسيماتِ السريعةَ تشعُّ موجاتٍ كهرومغناطيسيةً بوجودِ الحقولِ المغناطيسية. ويكونُ هذا الإشعاعُ علىٰ شكلِ حزمةٍ ضيقةٍ للغايةِ تشبهُ حزمةَ الضوءِ المنبعثةَ مِن نورِ الكشّافِ الدوّار. (انظر صورةً تخطيطيةً لهذا الأنموذجِ، في الشكل ٤,٧).

(١) الدُّوامةُ هي الحركةُ الدائريةُ السريعة. د.س



الشكل ٤,٧ : أنموذجُ غولْد للنابض: تبدأُ خطوطُ الحقلِ المغناطيسيِّ، وتنتهي، في النجم النيوترونيِّ المركزيِّ الذي يحيطُ به شريطٌ مِن الجسيماتِ المشحونة. وبينما يلفُّ النجمُ حول نفسِه، فإنَّ الشّحناتِ تتحركُ عَبْرَ خطوطِ الحقلِ المغناطيسيِّ، مُنتجةً إشعاعاً على طول المحورِ المغناطيسيّ.

وهكذا فلو حدثَ أنّنا كنا في منطقةٍ تقعُ ضمنَ مدىٰ حزمةِ ضوءِ النابضِ، فلسوفَ نحصلُ علىٰ نبضاتٍ مِن الإشعاعِ في كلِّ مرّةٍ تمتدُّ الحزمةُ فيها إلينا. ولذا فإنَّ فترةَ تذبذبِ النَّبْضِ تساوي بالضبط فترةَ لفِّ النجمِ النيوترونيِّ حول نفسه.

وإذا ما تتبعنا أنموذجَ غولْد بأكثرِ مِن ذلك، فقد يخطرُ لنا السؤالُ التالي: ماذا يحدثُ للنجمِ النيوترونيِّ الدّوار، عند استمراره علىٰ الإشعاعِ فترةً طويلة؟ مِن الواضح أنّ العمليةَ لا يمكنُ أن تستمرَّ إلىٰ الأبد. ومع مرورِ الوقتِ، فإنَّ النابضَ الدّوارَ يبطِئُ مِن سرعتِهِ وتزيدُ فترةُ نبضِه أو تذبذبه. وهكذا يمكنُنا أن نتصوَّرَ بأنَّ النابضَ الذي يبتدِئُ لفَّهُ سريعاً جدّاً، ثم هو يُبطِئُ من سرعتِه عند شيخوخته. إنَّ النابِضَ الذي يمتلكُ اليومَ فترةَ نبضٍ مِن ثانيةٍ واحدةٍ قد يُبطِئُ مِن سرعته إلىٰ فترةِ نبضٍ مِن ثانيتيْنِ، بعد مليونٍ مِن الأعوامِ، مثلاً.

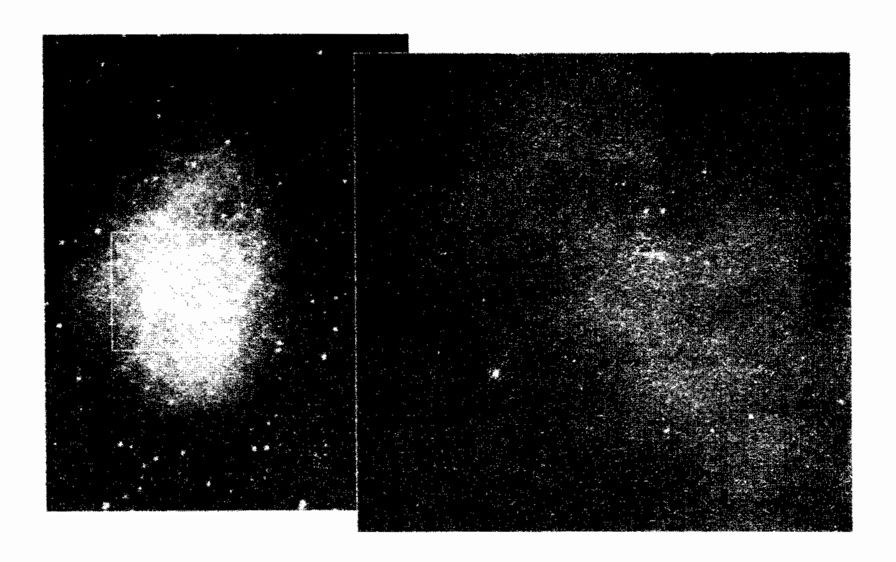
وهكذا فإنَّ بإمكانِ الفلكيينَ أن يُميّزوا، مِن خلالِ النظرِ إلىٰ النوابضِ في فتراتٍ مختلفةٍ، النابضَ العجوزَ مِن النابضِ الذي ابتدأَ حياتَه لِتوِّه. ويتباطأُ الحقلُ المغناطيسيُّ كذلكَ مع شيخوخةِ النابض، وهو سببٌ في تغيُّرِ شدّةِ الإشعاعِ وطيفهِ.

ورغمَ أنَّ هذهِ الصورةَ بَدَتْ مستقرّةً علىٰ أُسُسٍ ثابتةٍ نسبياً، فلقد كانت هناك مفاجآتٌ أخرىٰ تنتظرُ راصدي النابضِ، وكما سوف نرىٰ في الأجزاء الأخيرةِ مِن هذا الفصل.

نابضُ السَّرَطان The Crab pulsar

لو نظرْنا إلىٰ تعاقُبِ الأحداثِ التي تؤدي إلىٰ تكوّنِ النابضِ، فإننا نلاحظُ بأنَّ علىٰ النجم أن ينفجرَ أولاً، رامياً بغلافه إلىٰ الخارج، وهو يتركُ خلفه مركزاً يلفُّ حول نفسهِ صائراً نجماً نيوترونياً سريعَ اللفِّ. وعلىٰ افتراضِ أنه يمتلكُ حقلاً مغناطيسياً أيضاً، فإننا نتوقعُ له أن يصيرَ نابضاً.

وإذا ما سِرنا علىٰ هذا النَّمَطِ مِن التفكيرِ، فإننا يجبُ أن نرىٰ نابضاً قريباً مِن بقيةِ



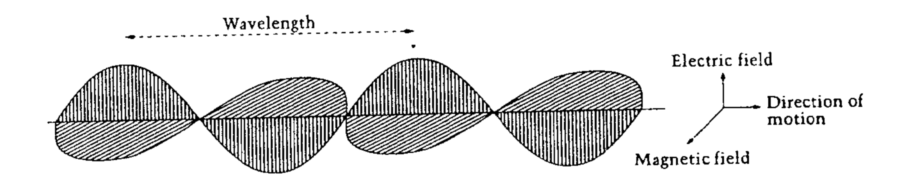
الشكل ٤,٨: سديمُ السَّرَطان Crab Nebula. إلىٰ اليسار: صورةٌ مِن مِرقابٍ أرضيّ. إلىٰ اليمين: الجزءُ المركزيُّ كما صَوَّرَهُ التلسكوبُ الفضائيُّ هابل Hubble Space Telescope، ويمكنُ مشاهدةُ نابضِ السرطان Crab pulsar قربَ المركزِ الأعلىٰ للإطار.

المستسعر. وهكذا فإنَّ سديمَ السَّرطانِ سوف يكونُ الحالةَ المثاليةَ لذلك. ولقد كان ذلك ثاني نابضٍ يتمُّ اكتشافُه. وقد أدىٰ هذا الاكتشافُ، أيضاً، إلىٰ حلِّ لُغزٍ طالَ أمَدُهُ حول سديم السرطان.

ويُرينا الشكلُ ٤,٨ صورةً أخرىٰ لسديمِ السرطانِ الذي رأيناهُ سابقاً في الشكل ٣,١، ونرىٰ فيهِ بقايا النابضِ بعد انفجارِ النجمِ قَبْلَ تسعةِ قرونٍ ونصفٍ تقريباً مِن الآن. والسحابةُ هي مسرحٌ لأنواعٍ مختلفةٍ مِن الفَعالياتِ، وهو ما يُشيرُ إلىٰ وجودِ عملياتٍ نشيطةٍ جداً كانت لا تزالُ جاريةً فيه، في الحِقبةِ التي نرصدُها. وكمثالٍ علىٰ ذلك، وباستثناءِ الأطوالِ الموجيةِ البصرية، فإنَّ سديمَ السرطانِ معروفٌ بأنه يشعُّ موجاتٍ راديويةً قويةً، إضافةً إلىٰ أشعةِ ـ أكس وأشعة غاما. فلنتوقفْ قليلاً لمعرفةِ هذهِ الأشكالِ المختلفةِ مِن الإشعاع. ، وتُلخِّصُ الفقرتانِ الآتيتانِ ما ناقشناهُ في الفصلِ الأول.

يعلمُ العلماءُ الآنَ أنَّ الضوءَ هو مثالٌ علىٰ حركةِ الموجةِ، إذ تتكوَّنُ الموجاتُ مِن اضطراباتٍ كهربائيةٍ ومغناطيسيةٍ ذاتِ طبيعةٍ متموّجة (انظر الشكل ٤,٩). وكما أننا نرىٰ سطحَ الماءِ يتموّجُ بموجاتٍ ترتحلُ نحو الخارجِ، عندما نرمي بحَجَرٍ إلىٰ بِركةِ ماءٍ، فكذلك تسيرُ الموجاتُ الكهرومغناطيسيةُ مِن مصدرِ الضوءِ نحو الخارج. ويبيّنُ الشكلُ ٤,٩ ما الذي نعنيهِ بطولِ الموجة.

إنَّ الشكلَ المرئيَّ مِن الضوءِ الذي اعتدْنا عليه (أي الضوءَ الذي تستجيبُ له أعيُننا حتىٰ «نرىٰ» الأشياءَ)، يبلغُ مدىٰ طولِه الموجيِّ ما بينَ ٣٩٠ و٧٧٠ نانومتراً[١] تقريباً. ما



الشكل ٤,٩: الموجةُ الكهرومغناطيسيةُ مصوَّرَةٌ هنا، وتُرينا الأشكالُ التي تشبهُ الموجاتِ كيف ترتفعُ وتنخفضُ الاضطراباتُ الكهربائيةُ والمغناطيسيةُ، في انسجام وتناغم في الفضاءِ، في مستوياتٍ عمودية. إنَّ المسافةَ بين قمّتيْنِ متتاليتيْنِ للموجةِ تُعرَفُ **بطولِها الموجيِّ wavelength**.

(١) النانومتر هو جزءٌ مِن ألفِ مليونِ جزءٍ مِن المِتر. د.س

الذي تمثّلُهُ الموجةُ إذا وقعَ طولُها الموجيُّ خارجَ هذا المدىٰ؟ إننا نُقسِّمُ، علىٰ العموم، مدىٰ الأطوالِ الموجيّةِ الكاملَ إلىٰ عدّةِ مناطقَ، والمنطقةُ التي تحوي أطولَ الموجاتِ تُعْرَفُ بمنطقةِ الموجاتِ الراديويةِ، أمّا تلك التي تحوي أقصرَها فهي منطقةُ أشعةِ غاما. وتقعُ بينهما الأشعةُ الدقيقةُ (المايكرو ويف)، والأشعةُ تحتَ الحمراءِ، والضوءُ المرئيُّ، والأشعةُ البنفسجيةُ، وأشعةُ أكس، بحسبِ ترتيبِ أطوالِها الموجيةِ التنازليّ (الشكل ٤,١٠).

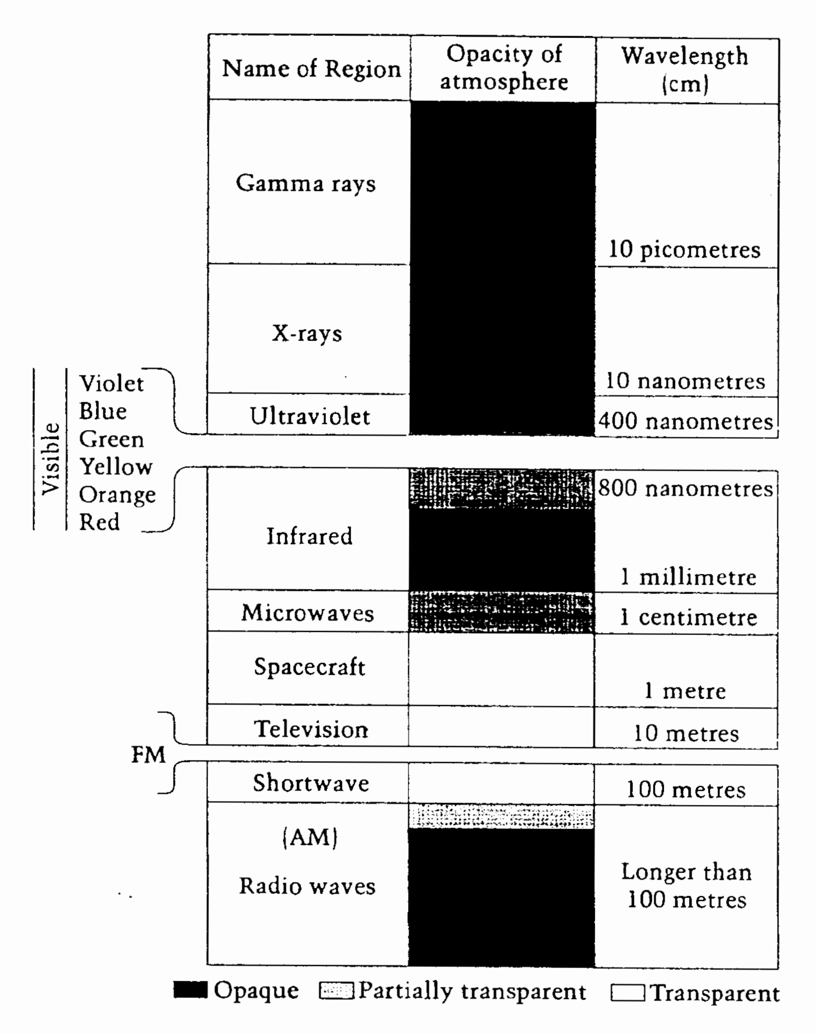
وتبعثُ الأشياءُ الفلكيةُ بإشعاعاتٍ علىٰ شكلِ موجاتٍ كهرومغناطيسيةٍ، وأكثرُ ما اعتدْنا عليه منها بالطبع هو الضوءُ المرئيُّ. ولكنْ، وكما قد رأيْنا، فإنها تبعثُ أيضاً بإشعاعاتٍ مِن أطوالٍ موجيّةٍ أخرىٰ، وقد تكونُ هذه، أحياناً، أكثرَ بكثيرٍ مِن إشعاعِها مِن الضوءِ المرئيِّ.

وسديمُ السرطانِ هو مثالٌ علىٰ هذه الحالاتِ. إنَّ إشعاعَ أشعةِ الراديو أو أشعةِ أكس يتطلبُ تجهيزاً مِن الإلكتروناتِ سريعةِ الحركةِ، في حقلٍ يكتنفُها. وإننا لَنتوقّعُ مِثْلَ هذه الإلكتروناتِ أن تكونَ حول السديم، ولكنَّ ثَمَّةَ بعضَ الصعوبة.

نحنُ نتذكرُ مِن الفصلِ الثالثِ أنَّ الانفجارَ الذي يحدثُ في المستسعرِ الأعظم يُحرِّرُ عدداً كبيراً مِن الجسيماتِ سريعةِ الحركةِ، ومِن ضمنِها الإلكتروناتُ. وقد اعتبرْنا ذلك علىٰ أنه مصدرٌ ممكنٌ للأشعةِ الكونية، ولكنَّ الانفجارَ كان قضيّةَ رَميةٍ واحدة. وحتىٰ لو كانت الإلكتروناتُ التي تحرَّرتْ في ذلك الوقتِ، قَبْلَ تسعةِ قرونٍ ونصفٍ مِن مشاهدتِنا لها، لا تزالُ موجودةً في السديم، فلا بُدَّ أنها فقدَتْ معظمَ طاقتِها الحركيةِ وأبطأَتْ مِن حركتها. وهكذا فلقد كان إنتاجُ الإشعاعِ الذي نراهُ في الوقتِ الحاضرِ لُغزاً محيّراً. لقد كانت تلك هي المعضلةَ التي أقَضَّتْ راحةَ الكثيرِ مِن فيزياويّي النجوم.

ويتذكرُ فريد هويْل، في حكايةٍ شخصيةٍ حول سديم السَّرطانِ، أنه قد أثارَ هذهِ المعضلةَ، عامَ ١٩٥٨، في جلسةٍ خاصةٍ خلالَ مؤتمرِ سولْڤاي في بروكسل، وبحضورِ الفيزياويِّ النجميِّ الهولنديِّ الأقدمِ جان أورْت، والفلكيِّ والتر بادي. وكان لِبادي أثرٌ مفيدٌ في الدراساتِ المفصّلةِ لسديمِ السرطان. وسأله هويل إن كان مِن الممكنِ البحثُ عن مصدرٍ ما في السديم. أرادَ بادي أن يعرفَ ما الذي يتوجبُ عليه أن يبحثَ عنه بالضبط. ورغمَ أنّ بادي كان مهتماً بالبحثِ عن مصدرٍ كهذا، إلاّ أنه لم يتتبعِ الأمرَ، ربما لأنّ التقنياتِ التصويريةَ التي كانت مُتاحةً له حينئذٍ لم تكنْ حساسةً بما فيه الكَفاية.

وقد تمَّ، في آخرِ المطافِ، اكتشافُ المصدرِ، عام ١٩٦٨، مِن قِبَلِ د.هـ. ستيلِن



الشكل ٤,١٠ : يُرينا هذا الجدولُ المنقولُ عن الشكل ١,١٣، المَدَياتِ المختلفةَ لأطوال الموجاتِ الكهرومغناطيسية.

وإي. سي. رايفِنشتاين، في المرصدِ الفلكيِّ الراديويِّ الوطنيِّ في غرينبانك، في الولاياتِ المتحدة. والحقُّ أنَّ أولَ ما تمَّ اكتشافُه هو بعضُ النبضاتِ «العملاقةِ» المعزولةِ فقط، والمبْتَعَثَةِ مِن المصدرِ أحياناً. وكشفَت التحرياتُ التاليةُ أنَّ المصدرَ هو نابضٌ بفترةٍ قصيرةٍ للغاية، وهي ٠,٠٣٣ مِن الثانيةِ فقط، أو ٣٣ **ميللي ثانية**[١].

(١) غالباً ما يكونُ استخدامُ وحداتِ الزمنِ الأقصرِ مِن الميللي ثانيةِ، أي جزءٍ مِن ألفِ جزءٍ مِن الثانيةِ، أكثرَ ملاءمةً لوصفِ فترةِ نبضِ النابضِ السريع.

ولكن، وباستثناءِ مصدرِ الراديو النابضِ بسرعةٍ فائقةٍ للغايةِ، فإنَّ للسرطانِ مفاجآتٍ أخرىٰ مُدَّخَرَةً. ففي ١٦ كانون الثاني مِن عام ١٩٦٩، تمَّ اكتشافُ **نبضاتٍ بصريةٍ optical pulses** صادرةٍ مِن نابضِ السرطان. ولقد وُجِدَ الاكتشافُ الفعليُّ علىٰ شريطٍ مسجَّلٍ تُرِكَ يعملُ سهواً مِن قِبَلِ الراصدينَ ويليم كوك، ومايك ديزني، ودونالد تايلور، في مرصدِ ستيوارد في توسكا بأريزونا. وقامت بعدئذٍ مجموعتانِ أخْرَيانِ بالإبلاغِ عن اكتشافِ نبضاتٍ بصريةٍ، واحدةٌ من ماكدونالد في تكساس، والأخرىٰ مِن مرصدِ كيت پيك الوطنيِّ في توسكانَ أيضاً. وتُظهِرُ إطاراتُ الصورِ المتتابعةِ، في الشكل ٤,١١، صورةَ النابضِ وهي تتوهجُ وتخبو بالتناوب. ويوضحُ المنحنىٰ تحت الصُّورِ كيف أنّ ارتفاعَ وانخفاضَ الشِدّةِ المرئيةِ يُشكِّلُ زوجيْنِ نموذجِيَّيْنِ مِن النابضات.

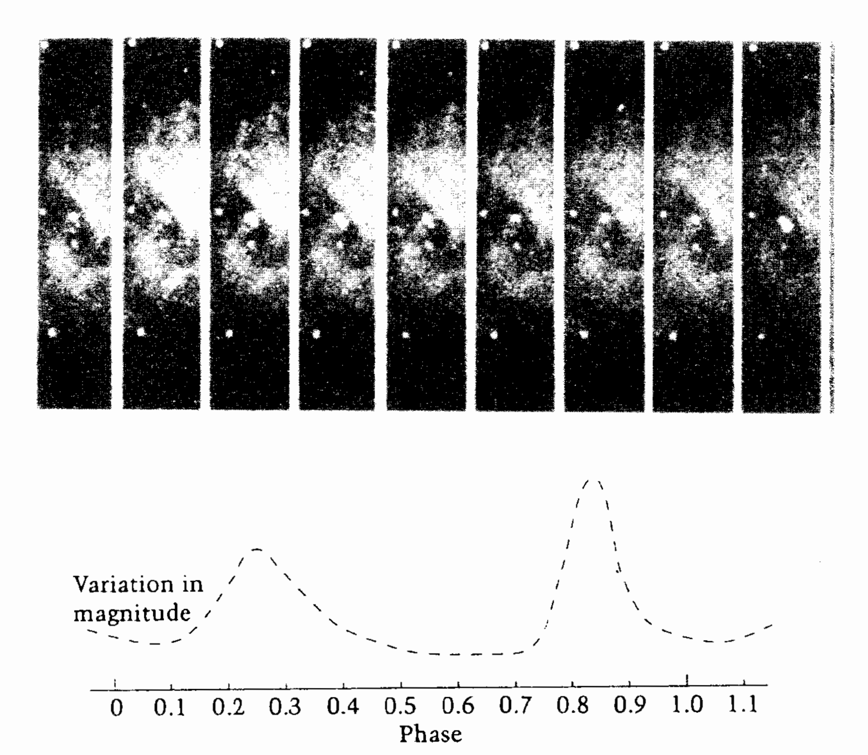
وجاءت الإضافةُ التاليةُ والمُثيرةُ للقصةِ في السنةِ ذاتِها، مِن خلالِ الاستخدامِ الفلكيِّ الناشئِ لأشعةِ أكس. فلقد أظهرَتْ رِحلتانِ صاروخيتانِ مجهزتانِ بكواشِفَ لأشعةِ أكس، واحدةٌ مِن مؤسسةِ ماساشوسيتس للتقنية، والأخرى من مختبرِ البحثِ البحريِّ للولايات المتحدة، أنَّ المصدرَ ينبضُ حتىٰ في أشعةِ أكس. ولقد تَوافَقَ شكلُ النبضاتِ في أشعةِ أكس مع نظيراتِها البصريةِ، وبدرجةٍ معقولة.

إنَّ الانبعاثَ في أشعةِ أكس والأشعةِ البصريةِ، مِن نابضِ السرطانِ، يَصْدُرُ علىٰ شكلِ نَبضاتٍ مِثْلَ بثّ الراديو، ولذا فهو أشبَهُ بالحُزمةِ التي تصدرُ عن منارةِ هدايةِ الملاحين، والتي وصفْناها سابقاً، ولكنهُ يصدرُ مِن مكانٍ أعلىٰ مِن سطح النابضِ، في الجوِّ المُمَغْنَطِ، حيثُ تتحرّكُ الجسيماتُ المشحونةُ كهربائيّاً قريباً جدّاً من سرعةِ الضوء. ذلكَ لأنَّ الجسيماتِ المشحونةَ، حتىٰ تحصلَ علىٰ إشعاعٍ بالتردداتِ العاليةِ للمنطقةِ البصريةِ ومنطقةِ أشعة أكس، تحتاجُ إلىٰ طاقاتٍ قد تصلُ إلىٰ بليونِ مرّةٍ قَدْرَ طاقةِ الكتلةِ في وضعِ الراحة[١].

ويُعرَف النابضُ في سحابةِ السرطانِ بالعلامةِ NP_{0532} أو $PSR_{0531\ +21}$ بالشكلِ الأكثرِ قياسيةً)، ويُعتقَدُ أنه المصدرُ الأوليُّ للطاقةِ في السحابة. ووجودُ النابضِ في مكانِ مستسعرٍ أعظمَ ما، أو علىٰ مقربةٍ منه، ليس شيئاً عامّاً. وسببُ ذلك هو أنَّ المستسعرَ الأعظمَ قد ينفجرُ بشكلٍ منحرف (انظر الشكل ٣,٢١ في الفصل السابق)، رامياً بمركزِهِ

---

(١) إنَّ الطاقةَ E تعطيها معادلةُ آينشتاين $E = mc^2$، حيث إنّ m هي كتلةُ الجسيمةِ في وضعِ الراحةِ، وC هي سرعة الضوء.



الشكل ٤,١١ : يوضّحُ تتابعُ الصُّوَرِ التوهجَ البصريَّ والخُفوتَ في مصدرِ سحابةِ السرطان. ونرىٰ في الأسفلِ ارتفاعَ الشِدَّةِ وانخفاضَها مرسومةً علىٰ المنحنىٰ البيانيِّ.

المتبقّي بعيداً عن غلافه. ولذا فإنَّ نابضَ السرطانِ يُعتَبرُ، وإلىٰ حدٍّ ما، استثنائياً، كونَهُ موجوداً داخلَ موقعِ الانفجار.

ولنتركِ الآنَ سحابةَ السرطانِ ومصنعَ طاقتِها المثيرَ، حتىٰ ننظرَ في أوجُهٍ غيرِ مألوفةٍ لظواهرِ النابض، والتي تكشّفتْ بعد اكتشافِه الأصليِّ بزمنٍ طويل.

النوابضُ المزدوجةُ (الثنائيةُ) ونوابضُ الميلّلي ثانية Binary and Millisecond Pulsars

قد يبدو، مِمّا قلناهُ حتىٰ الآنَ، أنَّ النوابضَ تولَدُ، بالضرورة، مِن مركزٍ مُتَبَقٍّ بعد انفجارٍ لمستسعرٍ أعظمَ. ولسوف تبدأُ مثلُ هذه النوابضِ باللَّفِّ حولَ نفسها، ولكنها تتباطأُ تدريجياً، كما أنها تصابُ بانحلالِ مجالِها المغناطيسيِّ. وبالفعلِ، يمكنُنا أن نربطَ المعدلَ الذي تزدادُ به فترةُ نَبْضِ النابضِ بآلِيَّةِ انبعاثِها، كما أننا نتوصلُ إلىٰ صورةٍ مفادُها أنّ النابضَ كلما كانَ أقدمَ عمراً، كلّما كانَ أبطأ في لفّهِ حول نفسه. وهناك حسابٌ تقريبيٌّ

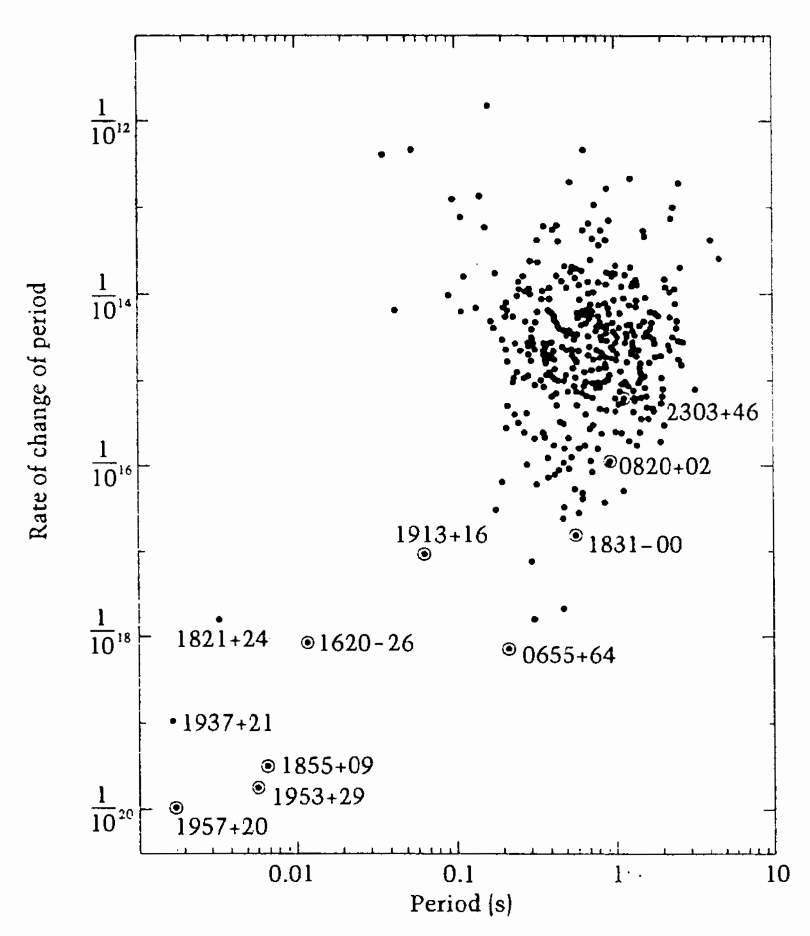
بسيطٌ يعطينا «عُمْرَ» النابضِ، ويتمُّ ذلك بالطريقةِ التالية: اقْسِم الفترة (زمنَ الإعادةِ) للنابضِ علىٰ ضعفِ المعدلِ الذي تتناقصُ به الفترةُ، والنتيجةُ هي عمرُ النابضِ مُقدَّراً بصورةٍ جيّدة.

ويُظهرُ الشكل ٤,١٢ رسماً بيانياً للنوابضِ التي يُعْرَفُ كلٌّ مِن فتراتِها (مرسومةً علىٰ المحورِ الأفقيّ)، ومعدّلِ الزياداتِ في فتراتِها (علىٰ المحورِ العموديّ). ويُفيدنا مِثْلُ هذا المخطّطِ في فهمِ كيفيةِ نشوءِ وتطوّرِ النابضِ مع زيادةِ عمرِهِ، مثلما أن مخطّطَ هـ - ر ينفعنا في فهمِ نشوءِ وتطوّرِ النجوم. ونلاحظُ هنا أنَّ عدداً كبيراً مِن النوابضِ تتجمعُ في القسمِ الأعلىٰ الأيمنِ مِن الشكلِ ٤,١٢. وهي تتوافقُ مع سيناريو المستسعرِ الأعظمِ الذي وصفناه.

علىٰ أنّ هناك نوابضَ قليلةً ذاتُ فتراتٍ منخفضةٍ جداً، لا بل إنّ معدّلَ الزيادةِ في فتراتها هو أقلُّ حتىٰ مِن ذلك. وبعضُها يُوجدُ علىٰ شكلِ أنظمةٍ ثنائية (وهي مُحاطةٌ بدائرةٍ، في الشكل ٤,١٢). واستناداً إلىٰ المعادلة التي ذكرْناها، فإنَّ أعمارَها تقرُبُ مِن **بليونِ عام**. وقد يشعرُ المرءُ، مِن خِلالِ النظرِ في الشكلِ ٤,١٢، بأنها سلالةٌ مختلفةٌ تماماً! وإنَّها لكذلكَ فِعلاً، ويكمنُ المفتاحُ الذي يدلّنا علىٰ أصلِها في الطريقةِ التي تنشأُ وتتطورُ فيها المنظومةُ النجميةُ الثنائية.

وتتألفُ المنظومةُ الثنائيةُ مِن نجميْنِ يدورُ أحدُهما حول الآخَرِ، وهي كثيراً ما نراها في السماءِ، رغمَ صعوبةِ تمييزِها بالعينِ المجردة. ولكنَّ النجميْنِ يكونانِ أحياناً قريبيْنِ الواحد مِن الآخرِ، وهو ما يؤدي إلىٰ تبادلٍ للكتلةِ بينهما. وهكذا فقد يحدثُ أن يكونَ أحدُ النجميْنِ نجماً نيوترونياً بالغَ الكثافةِ، بينما أنّ الآخَرَ عملاقٌ عظيم. وقد يصيرُ بإمكانِ النجمِ الأولِ أن يجذبَ المادةَ مِن الثاني، ثم إنَّ هذهِ المادةَ ترتحلُ سريعاً وتسقطُ علىٰ القرين المُتَراصّ. ولكنها عندما تسقطُ عليهِ فإنَّ دائرةً تُحيطُ بها تلفُّ بها علىٰ شكلٍ لولبيٍّ متّجهٍ إلىٰ الداخلِ. ويُظهِرُ الشكلُ ٤,١٣ ترتيباً مِن هذا القبيل. وتزدادُ سخونةُ المادةِ التي تلفُّ لولبياً، بسببِ الاحتكاكِ، وتشعُّ أشعةَ أكس. ولقد كشفتِ الأقمارُ الصناعيةُ المزودةُ بأشعةِ أكس، عن وجودِ مثلِ هذهِ المصادرِ المزدوجةِ المتعددةِ لأشعةِ أكس. وسوف نعودُ إلىٰ هذه الصورةِ في الفصلِ الآتي.

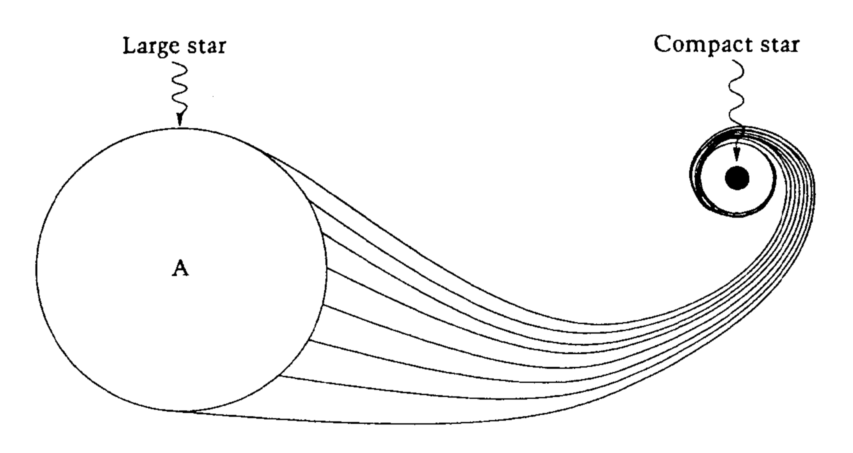
ولقد وُجِدَ بأنّ هذا السيناريو هو شيءٌ شائعٌ، مقارنةً بمصادرِ الأشعةِ المزدوجةِ. وقبلَ أن نرىٰ كيف هي تؤدي إلىٰ تكوينِ النجومِ النابضة، فَمِنَ المفيدِ أن ننظرَ في كيفيةِ



الشكل ٤,١٢ : توجدُ في هذا المخططِ أعدادٌ كبيرةٌ مِن النابضاتِ «القياسيةِ» في الجزءِ العلويِّ الأيمن. وهي تتوافقُ مع النظريةِ التي تقولُ بأنَّ أصولَها هي مستسعراتٌ عُظمىٰ. ولكنْ، ماذا نفهمُ مِن تلكَ التي هي في الركنِ السفليِّ الأيسرِ؟ إنَّ النابضاتِ المحاطةَ بدوائرَ هي نجومٌ ثنائية.

تطوّرِ منظومةِ النجوم المزدوجةِ ذاتِها إلىٰ هذه المرحلةِ، ويُرينا الشكلُ ٤,١٤ التسلسلَ التطوريَّ النموذجيَّ في مراحلَ أربعٍ، ونبدأُ، في المرحلةِ (أ)، بزوجيْنِ مِن النجوم، وهما «س» و«ص»، وبكتلتيْنِ نجميتيْنِ تبلغانِ ٨ و٢٠ كتلةً نجميةً علىٰ التوالي. إنَّ النجمَ «ص» يتطورُ بشكلٍ أسرعٍ، لأنه أكبرُ حجماً. وبعد ٦,٢ مِن ملايينِ الأعوامِ، يصبحُ «ص» نجماً عملاقاً، ويكتسبُ نصفَ قطرٍ يبلغُ مِن الضخامةِ حدّاً بحيثُ إنّه لا يتمكنُ مِن التماسكِ مع بعضِه البعض، تحتَ تأثيرِ القِوىٰ المَدِّيَةِ التي يسبّبُها صاحبُه.

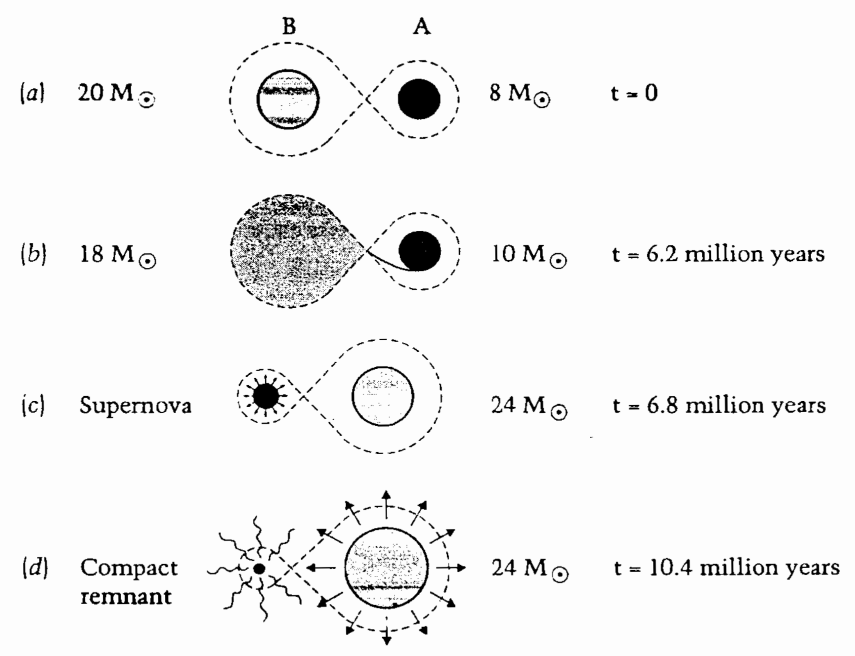
ونقولُ «القِوىٰ المَدِّيَةَ»، استناداً إلىٰ مِثال مَدِّ المحيطات. إنَّ الجذبَ الإضافيَّ الذي



الشكل ٤,١٣: سيناريو مَصْدَرِ أشعةِ إكس المزدوج، كما هو موصوفٌ في هذا الكتاب.

يسببُهُ القمرُ لسطحِ الأرضِ المُواجهِ له يؤدي بالمحيطاتِ في تلكَ المنطقةِ إلىٰ الارتفاع، مسبباً مدّاً عالياً. ويحدثُ الشيءُ ذاتُه للطبقاتِ الخارجيةِ من «ص»، بسببِ جذبِ قرينه «س». ونتيجةً لذلك، فإنّ المادةَ تبدأُ بالجريانِ مِن «ص» نحو «س»، وكما حدث في المرحلة (ب). ويُعرَفُ الشكلُ الأفقيُ المنقّطُ للرقم 8، والذي نراه في (أ) و(ب) **بفصّ روش** Roche lobe (نِسبةً إلىٰ إي .روش، الذي كان أوّلَ مَن أشارَ إلىٰ إمكانِ اضطرابِ المدِّ بسببِ تأثيرِ الكوكبِ السيارِ في قمره التابعِ له، عامَ ١٨٥٠). ويُحدِّدُ هذا الفصُّ الامتداداتِ الأوسعَ للنجميْنِ، والتي تمكِّنُهما مِنَ الاحتفاظِ بأشكالٍ لا تتمزّقُ. وحالما يتوسعُ النجمُ إلىٰ ما هو أكبرُ مِن فصِّ روش، فإنه يبدأُ في خسارةِ مادّتهِ السطحية. وبعد ٦,٨ مليونِ عام، فإنّ النجم «ص» ينفجرُ علىٰ شكلِ مستسعرٍ أعظم، تاركاً وراءه نجماً نيوترونياً. وفي الوقتِ ذاتهِ، فإنَّ كتلةَ النجم «س» تكونُ قد توسعت إلىٰ كتلةٍ تساوي ٢٤ ضِعْفَ كتلةِ الشمس، نتيجةً لتراكم المادةِ المُضافةِ والقادمةِ مِن النجم «ص». وهذا ما نراهُ في المرحلة (ج). وفي الخِتام، فإنَّ المرحلةَ (د) تصِلُ بنا إلىٰ الوضعِ النموذجيِّ لمصدرِ أشعةِ أكس المزدوج. وهنا يكونُ النجمُ «ص» قد صار عملاقاً أعظم supergiant، وتعبرُ المادةُ مِن سطحهِ عَبْرَ فصِّ روش، وتبدأُ بالجرَيان إلىٰ النجم «ص». إنَّ الريحَ النجميةَ هذهِ هي سببٌ لانبعاثِ أشعة أكس، بالشكلِ الذي شرحناهُ مِن قَبْلُ.

وهكذا نلمسُ أنَّ انتقالَ الكتلةِ، في المنظومةِ المزدوجةِ، يلعبُ دوراً أساسياً. ولمّا كانت الكتلةُ التي انتقلت مِن نجمٍ إلىٰ آخرَ تدورُ حول كتلةٍ مركزيةٍ مشتركة، فإنها تنقلُ



الشكل ٤,١٤ : أربعُ مراحل في تطوّرِ منظومة النجومِ المزدوجةِ، ويحدثُ فيها تبادلٌ للمادةِ بين مُكَوِّنَيْها الاثنين. إنّ M ⊙ تشيرُ إلىٰ كتلةِ الشمس.

معها قابليتها تلك علىٰ الدورانِ عندما تهبطُ علىٰ النجمِ الثاني. وكنتيجةٍ لذلك فإنَّ النجمَ الثانيَ سوف يدورُ بصورة أسرع. وهكذا فإننا نتوقعُ بأنَّ النجمَ المهجورَ سوف يدورُ بسرعةٍ عظيمةٍ، بعد أن صارَ أحدُ النجميْنِ المزدوجيْنِ (وهو هنا «ص») مستسعراً أعظم supernova.

ويُفَسِّرُ ذلكَ ما يُعرَفُ بنوابض الميللي ثانية millisecond pulsars التي تُقاسُ فتراتُها بالميللي ثانية وليس بالثانية، وتبلغُ فترة أحدِ نوابضِ الميللي ثانيةٍ هذه ١,٦ ميللي ثانيةٍ وحسب. وكان أندرو فراختر ود. شتاينبرغ وجو تايلور قد اكتشفوا هذا النجمَ النابضَ عامَ ١٩٨٨.

ونعودُ إلىٰ نشوءِ وتطورِ النجومِ المزدوجةِ، فنقولُ بأنَّ مصيرَ النجميْنِ النهائيَّ يمكنُ أن يكونَ بانتهائهما كمستسعرَيْنِ أعظميْنِ، تاركيْنِ وراءَهما نجميْنِ نيوترونييْن. وهناك احتمالٌ آخرُ يتمثّلُ في انفجارِ المنظومةِ وتفككِها، تاركةً وراءَها نجماً نيوترونياً واحداً. وهكذا فإنّ مِن الممكنِ أن تكونَ لدينا نوابضُ سريعةُ اللّفِّ حول نفسِها علىٰ شكلٍ منفردٍ، أو علىٰ شكلِ أعضاءٍ لمنظوماتٍ مزدوجة.

النجمُ النابضُ المزدوجُ PSR 1913 +16

إنّ أشهرَ النجومِ النابضةِ المزدوجةِ، وأوّلَ ما اكتُشِفَ منها، هو ذلك الذي اكتشفه راسل هولز وجو تايلور، من طريقِ طبقٍ لاقطٍ للأمواجِ الراديويةِ يبلغُ قطرُهُ ١٠٠٠ قدم، في آريسبو بپورتوريكو (الشكل ٤,١٥). ويتحركُ هذا النجمُ النابضُ، والذي يُعرَفُ باسمِهِ المفهرسِ PSR 1913 +16، بالإضافةِ إلىٰ نجم نيوترونيٍّ آخرَ، علىٰ شكلِ مزدوجٍ، وبمدارٍ يتمُّ إكمالُه في زمنٍ قصيرٍ جداً يبلغ ٣/٤ ٧ الساعة، وتبلغُ كتلةُ كلٍّ مِن النجمينِ حوالىٰ ١,٤ من كتلة الشمس. ويملكُ النجمُ النابضُ فترةً قصيرةً من ٥٩ ميللي ثانية، ومعدّلاً بطيئاً أيضاً لزيادة هذه الفترة. وهذه الفترةُ مستقرةٌ للغايةِ، وهي يمكنُ أن تعملَ عَمَلَ ساعةٍ، وبِدقَّةٍ تبلغُ ٥٠ مايكرو ثانية، لو نحنُ أخذْنا متوسّطَ أوقاتِ وصولِ النبضاتِ في فترة ٥ دقائق.

ونجيءُ الآنَ إلىٰ دِقّةِ التوقيتِ هذهِ، واستخدامِ الفيزياويينَ الباهرِ للنجمِ النابضِ PSR 1913 +16، لاختبارِ نظرياتِ الجاذبية. لقد مُنِحَ كلٌّ مِن هولز وتايلور جائزةَ نوبل، عامَ ١٩٩٤، مِن أجلِ اكتشافهما لهذا النجمِ النابضِ المثير.



الشكل ٤,١٥ : لقد وُضِعَ الطبقُ اللاّقِطُ في حفرةٍ مِن الأرضِ، وهو يستقبِلُ إشاراتٍ راديويةً مِن حزامٍ محدودٍ في السماء، بينما تدورُ الأرضُ حول محورِها. إنَّ تركيبَ هذا الطبقِ مُناسِبٌ، وبشكلٍ خاصٍّ، للعثورِ علىٰ النجومِ النابضة.

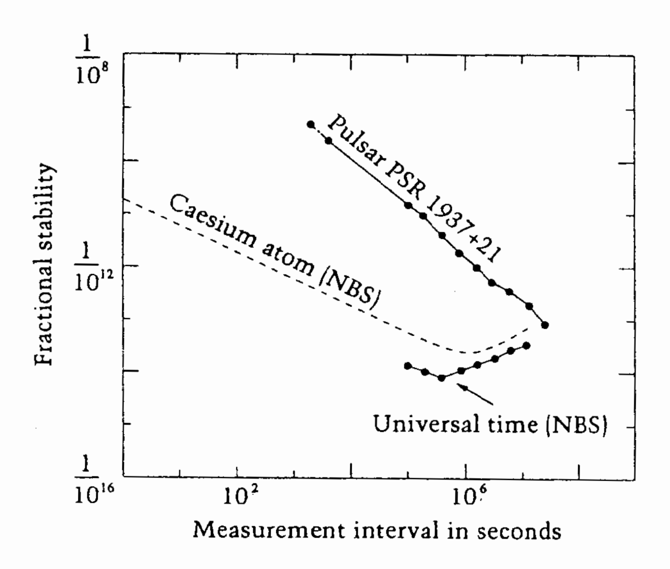
النجومُ النابضةُ باعتبارها ساعاتٍ قياسيّةً «معيارية»

لقد أشرْنا إلىٰ حقيقةِ أنَّ الفترةَ الزمنيةَ للنجمِ النابضِ CP 1919 يمكنُ إعطاؤها بِعَشْرِ درجاتٍ عشرية. لقد فتَحَتِ الفتراتُ المنتظمةُ للنَوابضِ، وخصوصاً في النجومِ النابضةِ في فتراتٍ تُقاسُ بالميللي ثانيةٍ، والتي اكتشِفَت في ثمانيناتِ القرنِ العشرين، فتَحَت البابَ، وبصورةٍ غيرِ اعتياديةٍ، أمامَ إمكانيةِ أن تقومَ النجومُ النابضةُ مَقامَ الساعاتِ بالنسبة إلى المظاهرِ الطبيعيةِ.

إنَّ التعريفَ الحاليَّ للزمنِ العامِّ (Universal Time (UT، أو الوقتِ الكونيِّ، أو السّاعةِ العالميةِ، يُقاسُ بوحداتِ ساعةِ السيزيوم المثالية idealized caesium clock. وتعتمدُ هذه الساعةُ علىٰ ذبذباتِ ذرّةِ السيزيوم. أمّا في الممارسةِ الفعليةِ، فيتمُّ تعريفُ الثانيةِ باعتبارها الأمدَ الذي تستغرقُهُ ٩١٩٢٦٣١٧٧٠ فترةً مِن فتراتِ الإشعاعِ المقابلةِ للانتقالِ بين حالتيْنِ محدّدتيْنِ لذرةِ السيزيوم. وعلىٰ أيةِ حالٍ، فإنَّ الفتراتِ الفاصلةَ المميّزةَ التي تترافقُ مع كلٍّ مِن هذه الانتقالاتِ الذريةِ ليست متشابهةً تماماً. علىٰ أنّ مِن الممكنِ أن نصِلَ إلىٰ فتراتٍ زمنيةٍ ثابتةٍ مِن خلالِ حسابِ معدّلاتِ ساعاتٍ عديدةٍ مِثلَ هذه. ولكنَّ النجومَ النابضةَ تبدو في وضعٍ أفضلَ لإعطائنا معاييرَ زمنيةً ثابتةً، وكما سيتضحُ لنا بعدَ قليل.

ويمكنُ لنا أن نُقَدِّرَ مدىٰ ثباتِ الساعةِ مِن خلالِ ما يُعرَفُ بتغاير ألان لأخطاءِ الساعة. وحتىٰ نحصلَ علىٰ هذا التغاير، نقومُ بقياسِ التقلّبات الحاصلةِ في الفترةِ الزمنيةِ باعتبارها جزءاً مِن الأخير، ثم نقومُ بأخذِ معدّلِ مربعاتِ هذه التقلباتِ. ولو استطعْنا أن نقيسَ هذه التقلباتِ علىٰ مدىٰ فترةٍ زمنيةٍ أطول، فإنه سيقلُّ، علىٰ شرطِ أن نكونَ متأكدينَ مِن ثَباتِ الفترةِ الزمنيةِ الأساسيةِ طيلةَ فترةِ إجراءِ القياسات. وهكذا، فكلما كانت الفترةُ الزمنيةُ أطول، كلما كان تغايُرُ ألان Allan variance أقلّ، وازدادتْ دِقَّةُ الساعة.

والفترةُ، بالنسبةِ إلى ساعةِ السيزيوم، هي في حدودِ الشهر. ونرىٰ في الشكل ٤,١٦ كيفَ أنَّ التغايرَ يقعُ في خلالِ فترةٍ مِن مليونِ ثانيةٍ أو ما يقرُبُ منها، ثم هو يبدأُ بالازديادِ. وعلىٰ العكسِ مِن ذلك، فإنَّ الرقمَ نفسَه يُرينا أنْ الفترةَ الزمنيةَ تبلغُ، بالنسبةِ إلى النجمِ النابضِ المعروفِ باسم PSR 1937 +21، **سنينَ!** ويعني ذلك أنَّ النجمَ النابضَ هو أقلُّ جودةً مِن الساعةِ الذريةِ، في مقاييسِ الزمنِ القصيرةِ التي تنوفُ علىٰ الشهر، ولكنه يتفوّقُ عليها في الأزمنةِ الأطولِ، وهو ما يجعلُهُ دقيقاً إلىٰ حدِّ **١٣ جزءاً عشرياً**.



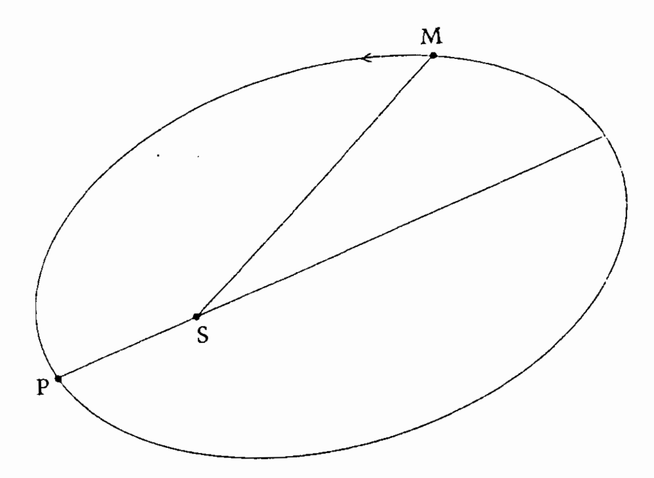
الشكل ٤,١٦ : يُرينا هذا الرسمُ البيانيُّ السلوكَ النسبيَّ لساعةِ السيزيوم والنجم النابض PSR 1937 +21. ويدُلُّ المحورُ الأفقيُّ على الفترةِ الزمنيةِ التي أُخِذَتْ فيها القِياسات. أمّا المحورُ العموديُّ فيدلُ على ثباتِ الساعةِ الجزئيِّ، مقيساً بتغايرِ ألآن.

وهكذا يمكنُ للمرءِ أن يبدأَ بالشكلِ التالي، لتركيبِ معيارٍ زمنيٍّ مبنيٍّ كُلّيَةً على النجمِ النابض. افترضْ أننا يمكنُنا أن نبيِّنَ، من خلالِ مراقبةِ النجومِ النابضةِ المُتَّسِقَةِ الجريَان، أنّ الفرقَ ما بينَ المعاييرِ الزمنيةِ المُعطاةِ مِن نجميْنِ نابضيْنِ هو **أقلُّ** مِن الفرقِ ما بين «الزمنِ العام» U.T ومُعدّلِ معيارِ النجمِ النابض. ويمكننا أن نعتمدَ كليةً، في هذه الحالةِ على النجومِ النابضة، باعتبارها ساعاتٍ أساسية. إنَّ ذلك سوف يُحسِّنُ مِن معاييرِ الزمنِ العام حتماً، مِن خلالِ تقليلِ التقلباتِ التي يُقاسُ فيها. ويبقى السؤالُ مطروحاً إنْ كانت النجومُ النابضةُ سوف تحلُّ مَحَلَّ الساعاتِ الذريةِ، في نهايةِ المطافِ، أم لا.

النجومُ النابضةُ واختباراتُ نظرياتِ الجاذبية

لقد ساعَدَت النجومُ النابضةُ، باعتبارها ساعاتٍ دقيقةً للغاية، علماءَ الفيزياءِ، بشكلٍ مُغايرٍ.

فلقد أثبتَ النجمُ النابضُ المسمى PSR 1913 +16، والذي تقدَّمَ الحديثُ عنهُ، بأنَّه مفيدٌ جداً لاختبارِ تنبؤاتِ نظريةِ النسبيةِ العامة لآينشتاين Einstein's general theory of relativity، بالمقارنةِ مع نظرياتِ الجاذبيةِ الأخرى. ولن ندخلَ هنا في تفاصيلِ النسبيةِ،



الشكل ٤,١٧ : إنَّ حركةَ عُطارد (M) الأساسيةَ تحت تأثيرِ جاذبية الشمسِ (S) هي عبارةٌ عن حركةٍ بيضاويةٍ حول الشمسِ في المركز. لاحظْ أنَّ بُعْدَ الكوكبِ السيارِ عن الشمسِ يتغيّرُ باستمرار، حيث إنه أقصرُ ما يكونُ عندما يقعُ الكوكبُ في النقطة (P)، وهي نقطةُ الحضيضِ الشمسيّ.

غيرَ أنَّ القارئَ يمكنُ أن يجدَ وصفاً للنظرية في الفصل الخامس.

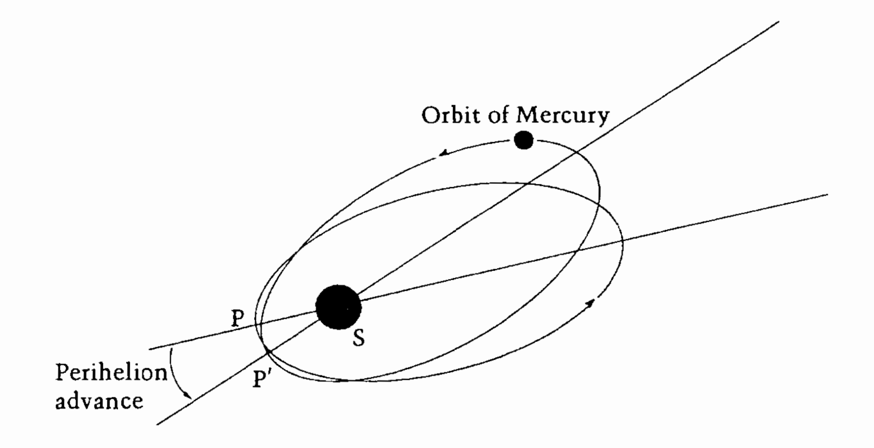
وتبدأُ نظريةُ النسبيةِ العامّةِ بدايةً مختلفةً جداً عن قانونِ الجاذبيةِ النيوتنيِّ الأبسطِ كثيراً، ولكنها، ولأكثرِ الأغراضِ العمليةِ، تنتهي بإعطائنا الأجوبةَ ذاتَها. وهكذا، فحتىٰ نعرفَ أيَّ النظريتيْنِ هي أقربُ إلىٰ الحقيقة، فإننا نحتاجُ إلىٰ اختباراتٍ أكثرَ دقةً، وقياساتٍ دقيقةٍ جداً، وظروفٍ خاصّةٍ نوعاً ما. ولقد كانت مِثْلُ هذهِ الاختباراتِ، ضمنَ منظومتنا الشمسيةِ، هي الأساسَ في زيادةِ مِصداقيةِ النسبيةِ العامةِ علىٰ حسابِ الجاذبيةِ النيوتنية. ولكنَّ هذهِ الاختباراتِ تحتاجُ إلىٰ قياساتٍ فائقةِ الدقة.

تَبدُّلُ الحضيضِ النجميّ The advance of periastron

لِنأخُذْ مثلاً الاختبارَ الذي تعطينا إياهُ حركةُ الكوكب السَّيارِ عُطارِد، حول الشمس. يُرينا الشكل ٤,١٧ أنَّ عطاردَ، وبحسبِ الجاذبيةِ النيوتنيةِ، يتوجبُ أن يتحركَ في مدارٍ بيضويٍّ حول الشمس، باعتباره مركزاً للقَطْعِ الناقصِ.

أمّا في واقعِ الحالِ، فإنَّ حركةَ عُطاردَ هي أكثرُ تعقيداً مِن ذلك بقليل، وكما نرىٰ في الشكل ٤,١٨. إنّ الخطَّ الذي يَصِلُ الشمسَ بذلك **الحضيضِ الشمسيِّ**[١] **perihelion**

(١) الحضيضُ الشمسيُّ هو أقربُ نقطةٍ في مَدار الكوكبِ السَّيارِ إلىٰ الشمس. د.س



الشكل ٤,١٨ : إنَّ الخطَّ SP، والذي يصلُ ما بين الشمسِ وأقربِ نقطةٍ إليها في مدارِ عُطاردَ، يدورُ في الفضاءِ ببطءٍ، ويظهرُ هذا التأثيرُ بشكلٍ مبالغٍ فيه لغرضِ التوضيح.

يُغيِّرُ مِن اتجاههِ ببطءٍ مع مرورِ الزمن.

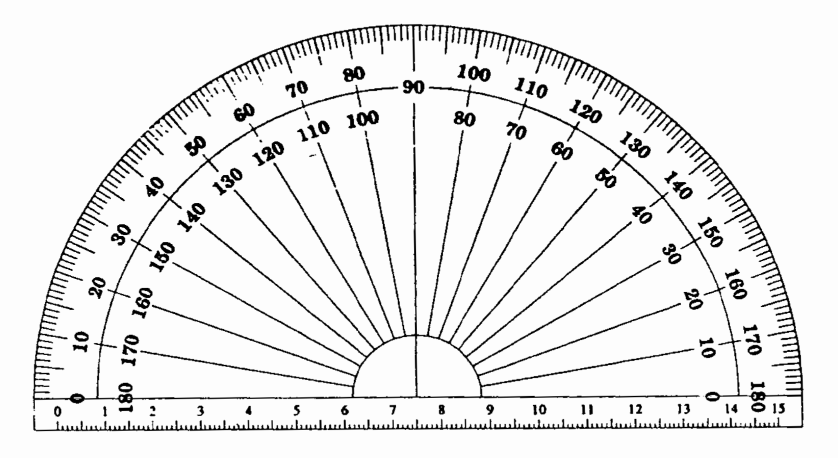
ولقد لوحظَ هذا السلوكُ الغريبُ في القرنِ التاسع عشر، وبُذِلَتْ محاولاتٌ عديدةٌ لفهمه في إطارِ نظريةِ الجاذبية لنيوتن. وهكذا فلقد عُرِفَ أنَّ جزءاً مهماً مِن هذه الحركة، علىٰ الخطِّ SP في الشكل ٤,١٨، ينتجُ عن جاذبيةِ الكواكبِ السيارةِ الأخرىٰ في المنظومةِ الشمسيةِ لِعُطارد، وخصوصاً مِن قِبَلِ الزُّهرةِ، والأرضِ، والمشتري. وعلىٰ الرغمِ مِن ذلكَ، فلقد بقيَ قسمٌ ضئيلٌ مِن التوازنِ مِن دونِ سببٍ معروف.

ويتبيَّنُ لنا مدىٰ ضآلةِ هذه الحاصَّةِ[١] anomaly مِن الشكل ٤,١٩ الذي يُظهِرُ نوعَ المِنْقَلَةِ التي تُستخدَمُ في دروسِ الرياضياتِ المدرسيةِ، لقياسِ الزوايا، بتقسيماتٍ صغيرةٍ مؤشَّرةٍ علىٰ حافتها الدائرية، وكلُّ قِسم منها يساوي درجةً واحدة. وإذا ما قسّمْنا الدرجةَ الواحدةَ إلىٰ ٦٠ قِسماً متساوياً، فسنحصلُ علىٰ مقياسٍ أصغرَ للزاويةِ يُعرَفُ **بالدقيقةِ القوسية**[٢] **minute of arc**. ثمَّ نقومُ بعملِ ٦٠ قسماً مِن دقيقةِ القوسِ، حتىٰ نحصل علىٰ ما يُعرَفُ **بالثانيةِ القوسية (second of arc (=arcsecond**. ولقد كان الانحرافُ الحاصيُّ anomalous shift للحضيضِ الشمسيِّ، منظوراً إليه مِن الشمسِ، يبلغُ مُعَدَّلاً قَدْرُهُ **٤٣ ثانية قوسيّةً في مائةِ عام**.

---

(١) الحاصَّةُ: هي البُعْدُ الزّاويُّ لكوكبٍ سيّارٍ عن أقربِ نقطةٍ له إلىٰ الشمس. د.س

(٢) القوس arc: جزءٌ مِن دائرةٍ يُمثِّلُ المسارَ الظاهريَّ لِجِرْمٍ سماويّ. د.س



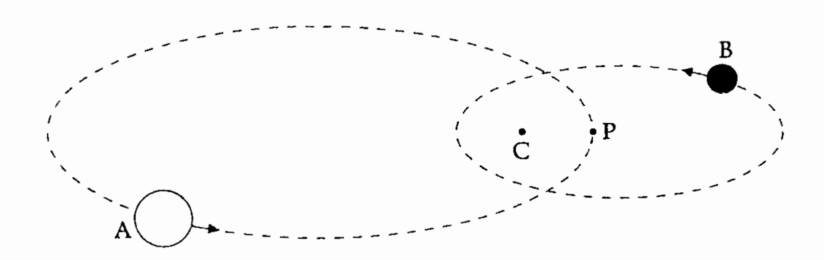
الشكل ٤,١٩ : إنَّ صورةَ المِنقلةِ هذه تذكِّرُنا بمدىٰ صِغَرِ الزاويةِ المؤلفةِ مِن درجةٍ واحدة.

ورغمَ الضآلةِ الباديةِ في هذا التباينِ، فلقد كانت تكفي لإشغالِ بالِ العلماءِ الذين كانوا قد وجدوا في قانونِ نيوتن للجاذبيةِ، حتىٰ ذلك الحينِ، انتظاماً كاملاً لدىٰ الرَّصْدِ. وهاهُنا جاءتِ النسبيةُ العامةُ بالجوابِ الصحيح، إذ إنّها أدخلتْ تعديلاً بسيطاً علىٰ الطريقةِ التي يدورُ بها الكوكبُ السيارُ حول الشمسِ، وأظهرت أنّها تفسِّرُ فعلاً و**بالضبط** الثلاثَ والأربعينَ ثانيةً الحاصَّةَ، لِكُلِّ قرنٍ.

لقد تنكّبنا، قليلاً، عن موضوعِ النجومِ النابضةِ إلىٰ الكواكبِ السيارةِ، حتىٰ نُبيِّنَ الفرقَ الصغيرَ، ولكنْ المهمَّ، بين نظَريةِ الجاذبية لكلٍّ مِن نيوتن وآينشتاين. وعلىٰ هذهِ الخلفيةِ يتوجبُ علينا أن ننظرَ إلىٰ التحسنِ العظيمِ في قياسِ الزمنِ، والذي حصلنا عليه من طريقِ النجومِ النابضةِ المزدوجة.

ونرىٰ، في الشكل ٤,٢٠، كيف أن النجميْنِ في PSR 1913 +16 يتحركانِ في منظومةٍ مزدوجةٍ، ويتّبعُ كلٌّ منهما مداراً بيضوياً. ولكنَّ الخطَّ الواصلَ بينهما يمرُّ عَبْرَ نقطةٍ ثابتةٍ في الفضاءِ تُعرَفُ **بمركز كتلةِ** الزوجيْنِ **centre of mass** of the pair[١]. وبالطبعِ، فعندما يبقىٰ مركزُ الكتلةِ ثابتاً، فإنَّ المسافةَ بينهما تتغيّرُ. وكما نتحدَّثُ عن

(١) تَصَوَّرْ طفليْنِ يجلسانِ علىٰ نهايتيْ منشارٍ أفُقيٍّ. إنَّ مركزَ كتلتِهما سيكونُ، في هذهِ الحالةِ، هو النقطةَ التي يرتكزُ عليها المنشارُ. وإذا كان أحدُ الطفليْنِ أثقلَ بكثيرٍ مِن الآخرِ، فإنه سوف ينتقلُ إلىٰ مكانٍ أقربَ إلىٰ هذه النقطةِ، حتىٰ يُحافظَ علىٰ توازنِ المنشار.



الشكل ٤,٢٠ : النجمُ النابضُ A، ومُرافقهُ النجمُ B، يتحركانِ في مداراتٍ بيضويةٍ، بحيثُ أنَّ مركزَ كتلتِهما C يكونُ ثابتاً في الفضاء. ويكونُ النجمُ النابضُ في الحضيضِ النجميِّ P، عندما تكونُ المسافةُ AB علىٰ أقلِّها. ويُلاحَظُ هنا أنَّ الاتجاهَ CP يتغيّرُ بمرورِ الوقت.

الحضيضِ الشمسيِّ في حالِ الشمس، يمكننا أن نتحدّثَ أيضاً عن الحضيضِ النجميِّ للنجومِ المزدوجة.

ويمكنُ، في واقعِ الحال، أن ننظرَ إلىٰ منظومةِ الشمس ـ عُطارد، أيضاً، باعتبارها منظومةً مزدوجة. ولكنَّ كتلةَ الشمسِ أكبرُ مِن كتلةِ عُطاردَ بسِتِّ ملايين مرّة، وكنتيجةٍ للفرقِ العظيم بين هاتيْنِ الكتلتيْنِ فإنَّ الشمسَ لا تكادُ تتزحزحُ تحتَ قوّةِ جذبِ عُطاردَ الضئيلة، إذ إنَّ مركزَ كتلتِهما يتطابقُ **تقريباً** مع مركزِ الشمس. وهذا الظرفُ الخاصُّ يُساعدُ العالِمَ الفيزياويَّ النسبيَّ علىٰ حسابِ معدّلِ تقدّمِ الحضيض الشمسيِّ لِعُطاردَ **بالضبطِ** تقريباً. أمّا في حالةِ النجمِ المزدوَجِ فإنَّ الوضعَ يختلفُ عن ذلك، فالنجمانِ (النجمُ النابضُ A ورفيقُه B) ذوا كتلةٍ متقاربةٍ، وهكذا فإنَّ إعادةً للحسابِ للحصولِ علىٰ أرقامٍ مضبوطةٍ هو أمرٌ غيرُ ممكن. إنَّ ما يُعرَفُ **بمشكلةِ الجسميْنِ الاثنينِ two-body problem**، والتي تتحركُ فيها كتلتانِ متقاربتانِ كلٌّ منهما تحت تأثيرِ جاذبيةِ الأخرىٰ، لَهِيَ معضلةٌ عسيرةٌ جداً، **وهي لم يتمَّ إيجادُ حلٍّ لها في نظريةِ النسبيةِ العامة**.

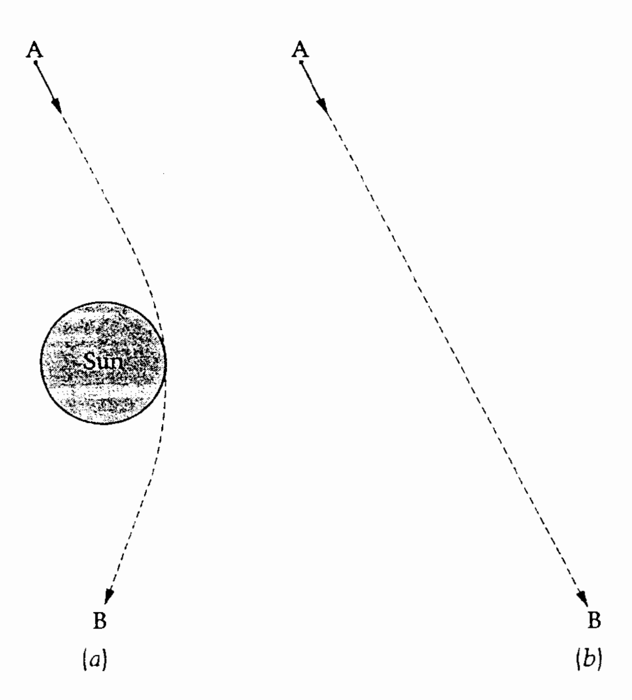
وعلىٰ الرغمِ مِن ذلكَ فإنَّ بإمكانِنا أن نحصلَ علىٰ حساباتٍ تقريبيةٍ يعتبرُها الناقدُ في هذا الحقلِ معقولَةً وموثوقة، وتُعطينا هذهِ الحساباتُ قيمةً لتقديمِ الحضيضِ الشمسيِّ التابعِ للنجمينِ المزدوجيْنِ PSR 1913 +16، بالمرتبةِ المناسبةِ، وهي تبلغُ، وكما قد لُوحظَ، ٤,٢ من الدرجاتِ في كلِّ عام (لاحظْ أنَّ هذا الفرقَ يبلغُ ٣٥٠٠٠٠ مرّةٍ بِقَدْرِ ذلك الذي نراهُ بالنسبةِ إلى عطارد). وهكذا فإنَّ النجمَ النابضَ المزدوجَ يُعطينا تأكيداً علىٰ صحةِ النسبيةِ العامّةِ مِن خلالِ انحرافِ الحضيضِ الشمسيِّ الملحوظ.

تأخُرُ الزمن

ثَمَّةَ تأثيرٌ آخَرُ تتفرّدُ به نظريةُ النسبية العامّة (ولا يوجدُ في نظريةِ الجاذبيةِ لنيوتن)، وهو يتعلقُ بالتأخّرِ الزمنيِّ الذي يحدثُ لإشارةٍ ضوئيةٍ مارّةٍ علىٰ مقربةٍ مِن جسمٍ ضخم. ولسوف نرىٰ في الفصلِ القادمِ كيف تتطلّبُ نظريةُ النسبيةِ العامةِ تعديلاً لقياساتِ المكانِ ـ الزمان، قُرْبَ جسمٍ كهذا، بسببِ تأثيرهِ الجاذبيّ. وهكذا فإنَّ رواحاً ومجيئاً لإشارةٍ راديويَّةٍ سوف يستغرقُ وقتاً أطولَ فيما لو أجرِيَتْ مِثْلُ هذه التعديلات.

ولقد لوحظَ مِثلُ هذا التأثيرِ، في المنظومةِ الشمسيةِ، مِن قِبَلِ سفينةِ الفضاءِ مارينَرْ، في إشاراتِ الراديو القافزةِ بعيداً عن المريخ، عندما **تُصافحُ هذهِ الإشاراتُ الشمسَ**. وبالمقارنةِ مع الموقفِ الذي لا تكونُ فيه الشمسُ قريبةً مِن هذهِ الإشاراتِ، فإنَّ هناك تأخيراً يبلغُ ٢٥٠ مايكرو ثانيةٍ تقريباً (انظر الشكل ٤,٢١).

وفي حالةِ النجمِ النابضِ المزدوجِ المعروفِ باسم PSR 1913 +16، فسوف تحتاجُ إشارةُ النجمِ النابضِ إلىٰ ٥٠ مايكرو ثانيةً إضافيةً حتىٰ تصلَنا عندما هي تمسُّ أفقَ النجم



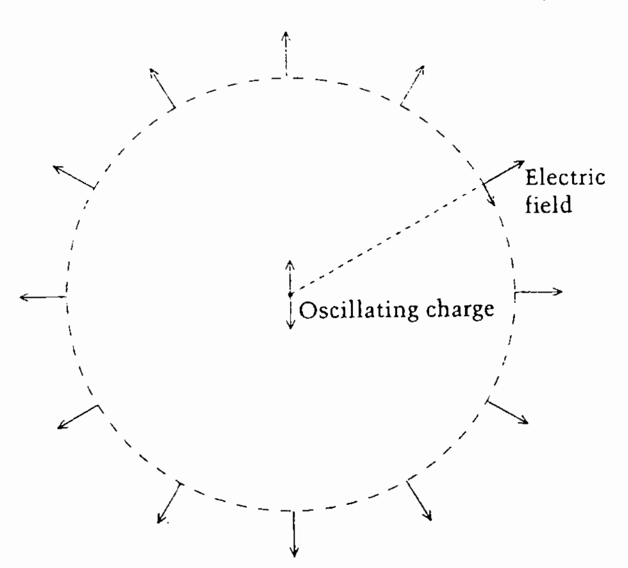
الشكل ٤,٢١ : (أ) رسمٌ تخطيطيٌّ لإشارةٍ تَمَسُّ سطحَ القمر. إنَّ الوقتَ الذي تستغرقهُ للوصولِ مِن A إلىٰ B هو أطولُ مِمّا لو لم تكنِ الشمسُ موجودةً في الصورة، كما في (ب).

النابض. ورغم ضآلةِ هذا التأثيرِ، فإنَّ مِن الممكنِ قياسهُ بدقّةٍ، ويعودُ الفضلُ في ذلك إلىٰ كونِ النجمِ النابضِ مُوَقِّتاً أو ساعةً دقيقةً. ولقد أكّدت القياساتُ ذلكَ التنبّؤَ، الذي جاءتْ به نظريةُ النسبيةِ العامةِ، والمذكورَ عاليَهُ.

وجودُ الإشعاعِ الجاذبيّ Gravitational radiation

رغمَ أنَّ تلك الاختباراتِ كانت مثمرةً جداً في دفعِ مصداقيةِ نظريةِ النسبية العامّةِ إلىٰ الأمام، فإنَّ أيّاً منها لم يُولِّدْ مِثْلَ تلك الإثارةِ العظيمة، عندما أُقيمَ البرهانُ (غيرُ المباشِرِ) علىٰ وجودِ موجاتٍ جاذبيّةٍ. فلنُنعم النظرَ، أولاً، في كيف يُتَوَقَّعُ أن يتمَّ إنتاجُ مثلِ هذهِ الموجات.

إنَّ تشبيهَ موجاتِ الجاذبيةِ هذه بالموجاتِ الكهرومغناطيسية لسوف يساعدُنا علىٰ هذا الفهم، إذ إنَّ أكثرَ الآليّاتِ أساسيةً لابتعاثِ مثلِ هذه الموجاتِ هو الشِّحنةُ الكهربائيةُ المتذَبذبة. وسوف تُوَلِّدُ حركةُ مِثْلِ هذه الشحنةِ، جيئةً وذهاباً، طاقةً علىٰ شكلِ موجاتٍ كهرومغناطيسيةٍ (انظرْ الشكل ٤,٢٢). ويمكنُ لكاشفِ الموجاتِ الكهرومغناطيسيةِ أن يكشف عن هذا الإشعاعِ بسهولة. علىٰ أنَّ بإمكاننا أن نستنتجَ وجودَها، بصورةٍ غيرِ



الشكل ٤,٢٢ : تُظهِرُ الأسهمُ حركةً متذبذبةً لشحنةٍ كهربائية. إنّ الشحنةَ سوف تشعُّ الطاقةَ الكهرومغناطيسيةَ علىٰ مسافاتٍ بعيدةٍ تبيّنُها الأسهمُ المتجهةُ إلىٰ الخارجِ عَبْرَ الخطِّ المنقّط. ويحدثُ مِثْلُ هذا الإشعاعِ في المستوياتِ التي تمرُّ عَبْرَ خطِّ حركةِ الشحنة. ويقعُ الحَقلُ الكهربائيُّ، بصورةٍ مُميّزةٍ، في هذا المستوىٰ، بينما يكونُ الحقلُ المغناطيسيُّ عمودياً عليه، وكلاهما عموديٌّ علىٰ اتجاه حركةِ الموجةِ إلىٰ الخارج.

مباشرةٍ، بالسؤالِ التالي: مِن أينَ تأتي هذهِ الطاقةُ؟ لا بدَّ أنها تجيءُ مِن حركةِ الشحنةِ الكهربائية. وكنتيجةٍ لذلك، وعندما تستمرُّ الشحنةُ في إشعاعها، فإنَّ حركتَها تتباطأُ مِثلَ تباطؤِ السيارةِ قُبالَةَ احتكاكها بالأرضِ عند إطفاءِ مُحرِّكها. وهكذا نستنتجُ بأنّ الشحنةَ الكهربائيةَ كانت تشعُّ الطاقةَ، مِن ملاحظةِ تضاؤلِ حركتها.

وكما أنَّ شحنةً متذبذبةً ما تشعُّ الموجاتِ الكهرومغناطيسيةَ فتتباطأُ نتيجةً لذلك، فكذلك هي المنظوماتُ الحركيةُ العملاقةُ التي تشعُّ موجاتِ الجاذبيةِ فتتباطأُ. وهذا شيءٌ نظريٌّ، بالطبعِ، إذْ لم يُفلحْ أحَدٌ بَعْدُ في قياسِ موجاتِ الجاذبيةِ الأرضية بصورةٍ مُباشرة.

وتُنبئُنا النسبيةُ العامّةُ بأنَّ المنظومةَ المزدوجةَ يمكِنُ أن تكونَ أبسطَ منظومةٍ مُشِعَّةٍ لموجاتِ الجاذبية، حيثُ تدورُ كلٌّ مِن الكتلتيْنِ حولَ الأخرىٰ، وكما في حالةِ النجم النابضِ المزدوجِ الموسومِ بـ 16+ 1913 PSR. ويُتَوَقَّعُ أن تنكمشَ منظومةُ النجم النابضِ المزدوجة. ويعني ذلكَ أن يدورَ الاثنانِ، أحدُهما حولَ الآخَرِ، في مداراتٍ أصغرَ وأصغر. وعندما تنكمشُ هذه المداراتُ، **تَقِلُّ** فترةُ دورانِ النجمِ المزدوج، وهو ما يُقَدَّرُ نظرياً برقمٍ صغيرٍ جداً يصلُ إلىٰ ٢,٤ البيكو ثانية(١)!

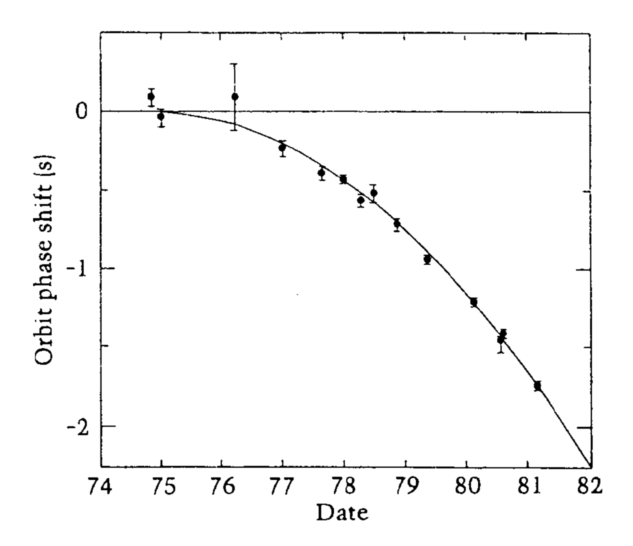
ولكنْ، وبفضلِ التوقيتِ الدقيقِ الذي يزوّدُنا به النجمُ النابضُ، فلقد أمكنَ قياسُ هذا الأثرِ الضئيلِ، والتحققُ منه. ولقد بلغَ هذا التغيّرُ التراكميُّ للطَّوْرِ في المدارِ ثانيتيْنِ، علىٰ مدىً أكثرِ مِن ستّةِ أعوام. ويُرينا الشكلُ ٤,٢٣ رسماً بيانياً لِمثلِ هذه الملاحظاتِ.

وتبدو حقيقةُ نُقصانِ الفترةِ المداريّةِ مِن تَغيُّرِ الطَّوْرِ هذا، ويُنظَرُ إلىٰ مُعدَّلِ التناقصِ المستمرِّ كتأكيدٍ علىٰ تنبّؤِ نظريةِ النسبية العامةِ بأنَّ مِثلَ هذهِ الأنظمةِ المزدوجةِ يتوجّبُ أن تشعَّ موجاتٍ جاذبيةٍ. وهناك نظرياتٌ أخرىٰ تتنبأُ بأشياءَ مماثلةٍ، ولكنْ بكمياتٍ مختلفةٍ، علىٰ أنَّ قياساتِ هذه المنظومةِ المزدوجةِ تبلغُ مِن الدقةِ درجةً بحيثُ إنها تستبعدُ كُليّاً بدائلَ كهذه.

وقد يترتّبُ علينا أن ننتظرَ إلىٰ مقتبلِ القرنِ الواحدِ والعشرين، حتىٰ يُمكنَ أن نُثبتَ وجودَ موجاتِ الجاذبيةِ إثباتاً مباشراً. وهناك كواشفُ عديدةٌ وكبيرةٌ تحتَ الإنشاءِ، في الوقتِ الحاضرِ، يُهدَفُ منها حصراً التقاطُ موجاتِ الجاذبيةِ المبتعَثةِ مِن النجومِ المزدوجةِ، في مداراتٍ تنكمشُ تدريجياً حتىٰ يلتحمَ النجمان. ولكنَّ النجمَ النابضَ المزدوجَ يُطمئنُنا إلىٰ أنَّ مثلَ هذه الموجاتِ لَهِيَ موجودةٌ فعلاً!

---

(١) إنَّ مليونَ مليون بيكو ثانيةٍ picoseconds تكوِّنُ ثانيةً واحدة. د.س



الشكل ٤,٢٣ : يمكنُ تقديرُ المواقعِ النسبيةِ، لنجميْنِ في منظومةٍ مزدوجةٍ، مِن خلالِ الطَّوْر phase، مَقيساً بالثواني. وعندما ينكمشُ المدارُ يدورُ المكوِّنانِ، أحدُهما حول الآخرِ، بسرعةٍ أكبرَ، يتغيّرُ هذا الطور. وقد تمَّ قياسُ تغيّرِ الطورِ للنجم المزدوج PSR 1913 +16، وهو مُعطىً هنا كما رسمه تايلون ووايزبيرغر، عام ١٩٨٤.

كواكبُ سيارةٌ حول نجومٍ نابضة

بيّنّا سابقاً كيف أنَّ الكواكبَ السيارةَ تولدُ كلَّما وُلِدَ نجمٌ ما (انظرْ الفصلَ الثالث)، مِن خلالِ انكماشِ سحابةِ الغازِ في الفضاءِ ما بين النجوم، وهو ما يعرَفُ بالنظرية السديمية[١]. وهكذا، فإننا نتوقعُ في العادة أن نجدَ كواكبَ سيارةً حول نجوم كالشمسِ تُنتِجُ طاقةً، بثباتٍ، مِن خلالِ اندماجِ الهايدروجين لتكوينِ الهيليوم. وبالفعل، فإننا نعرفُ الآن حالاتٍ قليلةً لنجومٍ مِن هذا النوعِ، مصحوبةٍ بكواكبَ سيارة.

ولكنْ، وفي عامِ ١٩٩١، كان هناك ادعاءٌ بالعثورِ علىٰ كوكبٍ سيارٍ يدورُ حول نجمٍ

(١) إنَّ الآيةَ الثلاثين من سورة الأنبياء ﴿أَوَلَمْ يرِ الذين كفروا أن السموات والأرض كانتا رتقاً ففتقناهما..﴾ قد جاءت قبلَ أربعةَ عشرَ قرناً بما قد جاءت به النظريةُ السديميةُ نفسه، وهو ما لم يُعرَف إلاّ في العصر الحاضر، فدلَّ ذلك علىٰ صدق رسالةِ رسول اللّه (ص). واللّهِ إنَّ هذه الآيةَ المعجزةَ لتكفي وحدَها لِسَوْق الكافرِ إلىٰ الإيمانِ سوقاً. وتمعّنْ، رحِمَك اللّهُ، في قمّةِ التحديّ، في قولِ الحقِّ سبحانه وتعالىٰ: ﴿أَوَلَم يرَ الذين كفروا﴾. إنها رؤيةٌ، للكافرين، أنذرَ بها وبشّرَ، قبل أربعةَ عشَرَ قرناً، فأيُّ تحدٍّ، بعد هذا، أصرحُ وأقوىٰ من ذلك؟ انظرْ كتابَ «أسرار الكون في القرآن» للمترجم، ط٢، دار الحرف العربي ـ بيروت (١٩٩٩).

نابض! ولكنْ إذا تذكَّرْنا مولدَ النجمِ النابضِ المحفوفِ بالأخطارِ فأنّىٰ له أن يكونَ لَهُ كوكبٌ؟ إنَّ أيّةَ كَواكبَ سيارةً قد تكونُ وُجِدَت لنجمٍ ما نابضٍ مِن قَبْلِ أن يصيرَ مستسعراً أعظمَ supernova، لا بدَّ أنها قد انفجرت وتطايرتْ أو دمَّرَها الانفجار. وهكذا، فعندما أعلَنَتْ كوكبةٌ مِن علماءِ الفلكِ الراديويِّ، مِن جودْرِل بانْك، عامَ ١٩٩١، أنَّ نجماً نابضاً معيَّناً يبدو أنَّ له كوكباً سياراً حولَهُ، فلقد جاءت تلكَ الأنباءُ مُفاجِئَةً تماماً.

كيف اكتشفَ أولئكَ الفلكيونَ ذلك؟ لقد بَدَتْ إشاراتُ النجمِ النابضِ وكأنَّها تُظهِرُ تذبذباً أو تَهادِياً طفيفاً لا يمكنُ تفسيرُهُ إلاَّ بامتلاكِ النجمِ النابضِ لكوكبٍ سيّارٍ يدورُ حوله، ويسبِّبُ له الاضطرابَ الجاذبيَّ. وهذا يشبهُ، إلىٰ حدٍّ ما، ما يحدثُ للنجومِ المزدوجةِ، حيثُ يؤثّرُ كلُّ نجمٍ في حركةِ صاحبه، ولكنْ لِأنَّ الكوكبَ السيّارَ، في هذه الحالةِ، أصغرُ بكثيرٍ مِن النجمِ، فإنه لا يتسببُ إلاَّ في حدوثِ أثرٍ ضئيلٍ جداً. وهكذا فإنّ النجمَ سوف يتذبذبُ قليلاً مع دورانِ الكوكبِ السيارِ حوله. إنَّ مدىٰ وفترةَ التذبذبِ هذهِ، يمكنُ أن تعطينا، لو أمْكَنَ قياسُها، فكرةً عمّا قد تكونُه كتلةُ الكوكبِ السيارِ، والزمنِ الذي يستغرقُهُ للدورانِ حول النجم (ولنتذكّرْ بأنّ الكوكبَ السّيارَ ذاتَهُ، غيرُ مرئيٍّ، لكونهِ غيرَ مضيءٍ). وهكذا فلقد اعتمدَتْ مجموعةُ جودْرِل بانْك علىٰ هذا الدليلِ غير المباشِرِ، في دعواها.

كان الإعلانُ عن هذا الاكتشافِ، بالطبعِ، نبأً مُفاجئاً ومثيراً. وكما يحدثُ كثيراً عند الإعلانِ عن حالاتٍ لاكتشافاتٍ غيرِ متوقعةٍ كهذه، فلقد تمَّ التحضيرُ بعدئذٍ لمؤتمرٍ خاصٍّ، لمناقشةِ تفاصيلِ دلائلِ هذا الاكتشافِ. ولكنْ تبيَّنَ أنَّ الاكتشافَ ذاتَه إخطارٌ كاذب! ولقد ثارت الشكوكُ في صحّتهِ عندما اكتُشِفَ بأنَّ الكوكبَ السيارَ المفترَضَ قد بدا أنَّ له فترةَ دورانٍ مِن ستةِ أشهُرٍ أو سنةٍ، متماثلاً تماماً مع فترةِ دورانِ الأرضِ! واتَّضحَ في نهايةِ المطافِ، ولأننا نُراقبُ النجمَ النابضَ مِن الأرضِ المتحركةِ، أنَّ حركتَنا تؤثِّرُ أيضاً في المُعطَياتِ، وتسببُ حدوثَ الشكلِ الدَّوريِّ. وهكذا، فإنَّ ذلك لم يكنْ بالتأثيرِ الحقيقيِّ، بل كان نابعاً، وبكلِّ بساطةٍ، عن مراقبةِ النجمِ النابضِ مِن مكانٍ متحرك. ومِن السخريةِ أنه، وفي المؤتمرِ الذي تراجعَ فيه أندرو لين، وهو مِن مؤسسة جودْرِل بانْك، عن ذلك الاكتشاف، فلقد أعلنَ فلكيٌّ يعملُ في التلسكوبِ الراديويِّ في آريسيبو في پورتوريكو، ويُدعىٰ ألكساندر وولزان، **أنه قد وجدَ نجماً نابضاً يمتلكُ كوكبيْنِ سيّاريْنِ اثنيْنِ**. ورقمُ هذا النجمِ النابضِ المفهرَسِ هو PSR 125 +12.

وإذا ما تعرَّضْتَ إلىٰ إخطارٍ كاذبٍ مرّةً، فلسوف تكونُ أقربَ إلىٰ عدمِ تصديقِ أيِّ

شيءٍ مُماثلٍ، ولسوف تطلبُ، بالطبع، التحقُّقَ مِن السِّجلاتِ وتدقيقَها، مرّةً بعدَ مرّةٍ. ولكنَّ وولزان كان قد اتخذَ احتياطاتٍ كافيةً لاستبعادِ أيِّ أثرٍ لحركةِ الأرضِ في حساباته، واستبعادِ أيِّ أثرٍ زائفٍ آخرَ. وهكذا فلقد كان واثقاً مِن حقيقةِ ما وجدَه، وهو شيءٌ قامَ الآخَرونَ بالتحقّقِ منهُ مجدداً.

وهكذا صارَ مِن المعلوم لديْنا أنَّ هناك كوكبيْنِ سياريْنِ، علىٰ الأقلِ، يدورانِ حول نجم نابضٍ معيَّنٍ، وتبلغُ كتلةُ أحدِهما ٢,٨ أضعافِ كتلةِ الأرضِ، وكتلةُ الآخرِ ٣,٤ مِن كتلةِ الأرضِ، وتقرُبُ فترةُ دورانِهما مِن ٦٦,٦ اليوم و٩٨,٢ اليوم، علىٰ التوالي، أي أنهما يتحركانِ سريعاً نسبياً، كالزُّهرةِ وعُطارد. ويبلغُ بُعدُهما عن النجمِ الأمِّ ٧٠ مليونَ كيلومترٍ و٥٤ مليونَ كيلومتر، علىٰ التوالي، أي أنهما قريبانِ الواحد من الثاني نسبياً (وللمقارنةِ، فإنَّ الأرضَ تدورُ حول الشمسِ علىٰ مسافةِ ١٥٠ مليونَ كيلومتر). ويدَّعي الراصدونَ أنَّ هناك كوكباً سياراً ثالثاً في المنظومةِ ذاتها. ولكننا لا نزالُ نجهلُ كيفيةَ وصولِ تلك الكواكبِ السيارةِ إلىٰ هناك، وهذهِ معضلةٌ يقعُ علىٰ عاتقِ العلماءِ أمرُ تدبُّرِها!

قصّةٌ لم تنتهِ

وهكذا تنتهي حكايتُنا عن أعجوبةِ الكونِ الرابعةِ، ولكنْ لا تزالُ هناك أسئلةٌ كثيرةٌ، حول النجوم النابضةِ، تنتظرُ الإجابةَ. ويكفي أن نقولَ بأنَّ النجومَ النابضةَ لا تزالُ تُضيفُ أبعاداً جديدةً إلىٰ الاكتشافِ الأصليِّ الذي تمَّ في عام ١٩٦٧. وكما اختتمَ تايلور وشتاينبرغ مقالةً لهما، **فإنَّ هذا الحقلَ يَعِدُ بأفكارٍ جديدةٍ وحماسةٍ جديدةٍ.**

الأعجوبة (٥)

الجاذبيةُ ذلكَ المُستبِدُّ العظيمُ

قد يبدو الزمانُ، في أمكنةٍ أو أزمنةٍ مختلفةٍ، أطولَ أو أقصر، ونحنُ لا نَعجَبُ مِن هذه الفكرة، وذلك بفضل الثورةِ التي أحدثها ألبرت آينشتاين[١] (الشكل ٥,١)، مِن خِلالِ نظرياتهِ في النسبيةِ الخاصةِ والعامةِ[٢]، لا بَلْ قد واجهَ الفلكيونَ أمثلةً في الكونِ تنسجمُ مع ذلك. وهاكَ مِثالاً تلعبُ فيه إحدىٰ قِوىٰ الطبيعةِ الأساسيةِ دوراً أساسياً.

---

(١) ولد آينشتاينُ لأبٍ يهودي يفاخرُ بانطلاقه من قيود اليهودية ومجاراة عصره في قبول الفلسفة المادية التي سادت في أواخر القرن التاسع عشر، ولكن لا غرابة أن يؤمن آينشتاينُ الابنُ بالله تعالى، فيقولَ مدفوعاً بالعلم: (إن هذا التناسق بين قوانين الطبيعة، وما يُخفي وراءه مِن عقلٍ جبّار لو اجتمعتْ كلُّ أفكار البشر إلى جانبه لما كوَّنت غير شعاع ضئيلٍ أقرب إلى القول فيه: إنه لا شيء) د.س

(٢) ولكنَّ المسلمينَ قد عرفوا النسبية مَنذُ أكثرَ مِن أربعةَ عشرَ قرناً، وكيف يعجبُ المسلمُ، اليومَ، مِن أمرِ النسبيةِ، وهو يقرأُ في كتاب اللَّه تعالىٰ، في كلِّ حينٍ: .

﴿تعرج الملائكة والروح إليه في يوم كان مقداره خمسين ألف سنة﴾ [المعارج: ٤] × ٥٠ × ١٠٠٠ × ٣٦٥,٢٥ = × ١٨٢٦٢٥٠٠٠.

﴿ويوم يحشرهم كأن لم يلبثوا إلاً ساعة من النهار﴾ [يونس: ٤٥] × ٧٠ × ٣٦٥,٢٥ × ٤ = × ١٠٢٢٧٠.

﴿يوم يدعوكم فتستجيبون بحمده وتظنون إن لبثتم إلاً قليلاً﴾ [الإسراء: ٥٢] × ؟.

﴿ويوم تقوم الساعة يقسم المجرمون ما لبثوا غير ساعة﴾ [الروم: ٥٥] × ١٠٢٢٧٠.

﴿ثم يعرج إليه في يوم كان مقداره ألف سنة مما تعدون﴾ [السجدة: ٥] × ١٠٠٠ × ٣٦٥,٢٥ = ٣٦٥٢٥٠.

﴿كأنهم يوم يرون ما يوعدون لم يلبثوا إلاً ساعة من نهار﴾ [الأحقاف: ٣٥] × ١٠٢٢٧٠.

﴿كأنهم يوم يرونها لم يلبثوا إلاً عشية أو ضحاها﴾ [النازعات: ٤٦] × ٧٠ × ٣٦٥,٢٥ × ٢ = × ٥١١٣٥.

﴿قال كم لبثت قال لبثتُ يوماً أو بعض يوم﴾ [البقرة: ٢٥٩] × ٣٦٥,٢٥ × ٧٠ = × ٢٥٥٦٧,٥.

﴿وإنَّ يوماً عند ربك كألف سنة مما تعدون﴾ [الحج: ٤٧] × ١٠٠٠ × ٣٦٥,٢٥ = × ٣٦٥٢٥٠. =



الشكل ٥,١ : ألبرت آينشتاين
.Albert Einstein

إنَّ هذه القوةَ هي قوةُ الجاذبية Force of gravity .

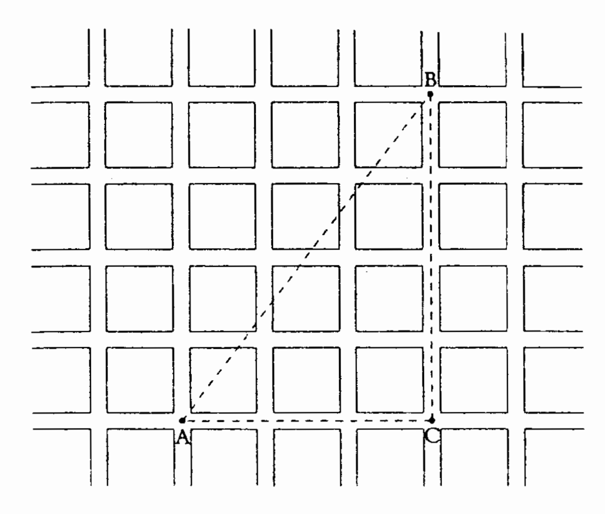
المكانُ والزمانُ والحركة

تعودُ قصّتُنا إلىٰ عام ١٩٠٥، عندما قامَ شابٌّ شَغِّيلٌ يعملُ في مكتبِ رُخَصٍ سويسريٍّ في بيرن، بكتابةِ بحثٍ أحدثَ ثورةً في فكرةِ الزمانِ والمكان. وقد عَنْوَنَ ألبرت آينشتاين بحثَه بعنوانِ «علم الحركة الكهربائية للجسيماتِ المتحركة» .Electrodynamic, bewegter körper (electrodynamics of moving particles) ولكن، لماذا أدخلَ هذا البحثُ أفكاراً جديدةً، وبصورةٍ جذريةٍ، في كيفيةِ قياسِ المراقبينَ للمكانِ والزمان؟

فلنبدأ بمثالٍ لا يبدو غريباً علينا، لقياسِ المكان، إذ نَجدُ في الشكل ٥,٢ مدينةً بشوارِعِها وطُرُقِها المشجّرةِ، ممتدَّةً علىٰ شكلٍ مستطيل، ولسوفَ نقولُ بأنَّ الشوارعَ تمتدُ مِن الشمالِ إلىٰ الجنوبِ، وإنَّ الطرُقَ المشجّرةَ تمتدُّ مِن الشرقِ إلىٰ الغربِ. ولنفرضْ أنَّ هناك، في المدينةِ، الموقعيْنِ A وB، ونريدُ قياسَ المسافةِ بينهما **بخطٍّ مستقيمٍ، ومثلما يطيرُ الغرابُ بأقصرِ الطرُقِ**.

وليس ذلك بالأمرِ اليسيرِ، بالطبع، لأنَّ الناسَ لا يمكنُهم أن يطيروا كالغراب، لا ولا يمكنهم أن يسيروا عَبْرَ الجدرانِ والعوارضِ التي يمرُّ الخطُّ المستقيمُ مِن خلالِها.

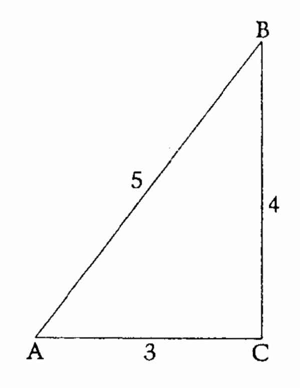
= ﴿قالوا لبثنا يوماً أو بعض يوم فسئل العادين﴾ [المؤمنون: ١١٣] × ٣٦٥,٢٥ × ٧٠ = ٢٥٥٦٧,٥.
وبينا قد تكونُ هذه النِّسبُ بَدَتْ مُغرِقةً في الغرابةِ، في زمن التنزيلِ العزيز، فإنها قد تقدّمتْ علىٰ النظريةِ النسبيةِ لآينشتاينَ بأربعةَ عشرَ قرناً، وهي نظريةٌ تعتبرُ مِن أعظم نظريات العصرِ الحاضر وفتوحاتِه، ولا تزال. د.س



الشكل ٥,٢ : مدينةٌ تحتوي علىٰ شبكةٍ مِن الشوارعِ والطرُقِ المشجّرةِ، ممتدّةً علىٰ شكلٍ مستطيلٍ، باتجاهاتِ شمال ـ غرب، وشرق ـ غرب. كيف نقيسُ المسافةَ AB؟ يمكنُنا، بالطبع، أن نقيسَ AC و CB.

لا بَلْ إنهم محدودونَ بالمشيِ عبرَ الشوارعِ والطرُقِ المشجّرة. وهكذا فإننا نسيرُ إلىٰ الشرقِ علىٰ طولِ الطريقِ عبرَ C وإلىٰ حدِّ الموقعِ B. ويمكنُنا أن نقيسَ المسافتيْنِ AC و CB، ثم نرسمَ المثلثَ ABC كما في الشكلِ ٥,٣. ولمّا كنّا نعلمُ بأنّ الزاوية ACB هي زاويةٌ قائمةٌ، فيمكننا أن نحسبَ المسافةَ AB باستخدامِ نظريةِ فيثاغورس: $AB^2 = AC^2 + CB^2$.

فإذا كان طولُ AC يساوي ٣ كيلومتراتٍ، وطولُ CB ٤ كيلومتراتٍ، فإنَّ تلك النظرية تنبئُنا بأنَّ طولَ AB سيكونُ ٥ كيلومترات. ولذا فإنَّ بإمكاننا، علىٰ وجهِ العمومِ، أن نحسبَ المسافةَ AB بقياسِ الشريحتيْنِ المنفصلتَيْنِ AC و CB باتجاهيْنِ متعامديْنِ.



الشكل ٥,٣ : المثلثُ ABC له زاويةٌ قائمةٌ في رأسه (C).

ولننظر الآنَ إلىٰ موقفٍ يختلفُ قليلاً، وكما يبدو في الشكل ٥,٤، حيث إنّ تلك المدينةَ لا تمتلكُ شوارعَ ولا طُرُقاً مشجَّرةً تمتدُ بالاتجاهاتِ شرق ـ غرب، وشمال ـ جنوب، بل إنَّ الطُرُقَ المشجّرةَ تمتدُ مِن الجنوبِ الغربيِّ إلىٰ الشمالِ الشرقيِّ، بينما تمتدُ شوارعُها مِن الشمالِ الغربيِّ إلىٰ الجنوبِ الشرقيّ. وهكذا يتمُّ الحصولُ علىٰ منظومةِ ممرٍّ جديدةٍ مِن خلالِ تدويرِ المنظومةِ السابقةِ ٤٥ درجةً.

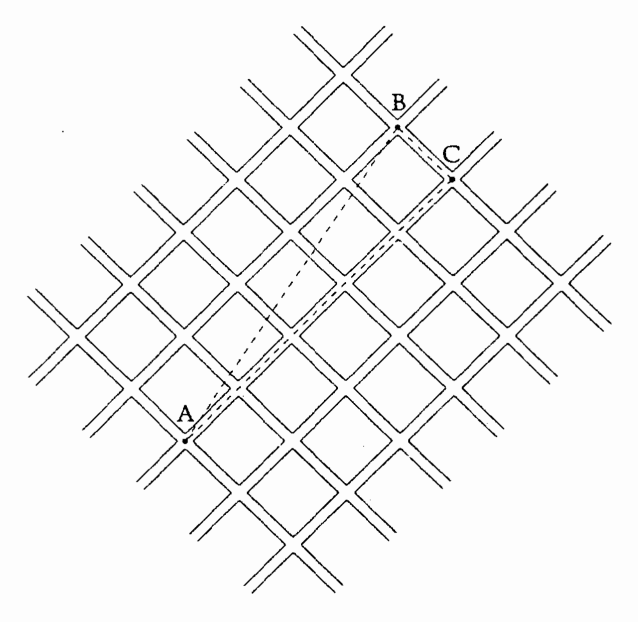
وبالطبعِ، فإننا إذا ما أعدْنا تجربتَنا بالذهابِ عبرَ النقطةِ C التي تقعُ علىٰ الطريقِ المشجّرِ عبرَ A والشارعِ عبرَ B، فسوف تكونُ لدينا أطوالٌ مختلفةٌ لِـ AC و CB، ولسوف يبدو المثلثُ الجديدُ كالذي نراه في الشكل ٥,٥ .**أمّا فيما يخصُّ المسافةَ AB، فإنها سوف تكونُ هي ذاتها**. وسوف يعطينا تطبيقُنا لقاعدةِ أرخميدس على المثلثِ الجديدِ الجوابَ ذاتَه، علىٰ الرغمِ مِن اختلافِ منظومةِ الشارعِ ـ الطريقِ المشجَّر عن ذي قبل، مِن خلالِ تدويرها ٤٥ درجةً.

ونقولُ بلغةِ الحسابِ **بأنّ المسافةَ AB لا تتغيّرُ (كميةٌ ثابتة) بتدويرِ منظومةِ الممرّات**.

وهكذا فإنّ المسافةَ AB تملكُ وضعاً خاصّاً، بمواجهةِ الطوليْنِ الآخريْنِ AC و CB. وكيفما أدرْنا منظومةَ ممرّاتِ المدينةِ، فإنّ المسافةَ AB سوف تبقىٰ هي ذاتَها، رغمَ أنّ المسافتينِ الأُخريَيْنِ AC و CB سوف تتغيرانِ في كلِّ مرّة.

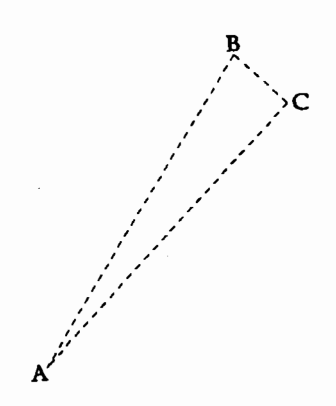
إنَّ مثالَ منظومةِ الممرّاتِ الدائرةِ يوضّحُ المظهرَ الأساسيَّ للمكانِ ذي البُعديْنِ. وحتىٰ نعرفَ موضعَ أيِّ تقاطعٍ في المدينةِ، فإننا نحتاجُ إلىٰ اتجاهيْنِ اثنين، أي الشارعِ والطريق المشجّرِ اللّذيْنِ يقعُ عليهما. وهكذا فإنَّ عددَ أبعادِ المكانِ يساوي عددَ بنودِ المعطياتِ المحتاجةِ لتحديدِ أيِّ موضعٍ في ذلك المكان. ولنتصورْ مثلاً أنَّ هناك، في الموقعِ B، ناطحةَ سحابٍ، وأننا نحتاجُ إلىٰ مُلاقاةِ شخصٍ ما يقطنُ فيها. إننا نحتاجُ لذلك الغرضِ إلىٰ أن نُحدِّدَ الطابقَ الذي يسكنُ فيه ذلك الشخصُ. وهكذا فإننا نحتاجُ إلىٰ **ثلاثةِ بنودٍ** مِن المعلومات، لأننا نتعاملُ الآنَ مع مكانٍ مِن ثلاثةِ أبعاد. ويُرينا الشكلُ ٥,٦ المكانَ الذي يقطنُه الشخصُ، في D.

ولكنَّ الخاصيةَ الأساسيةَ لِثبوتِ المسافةِ بين نقطتيْنِ في المكانِ تستمرُّ في انطباقِها في حالةِ الأبعادِ الثلاثة. وكيفما حدّدْنا عناصرَ المعلوماتِ الثلاثةَ التي نحتاجُ إليها للوصولِ مِن A إلىٰ الشخصِ في D، فإنَّ المسافةَ AD سوف تبقىٰ هي ذاتَها.

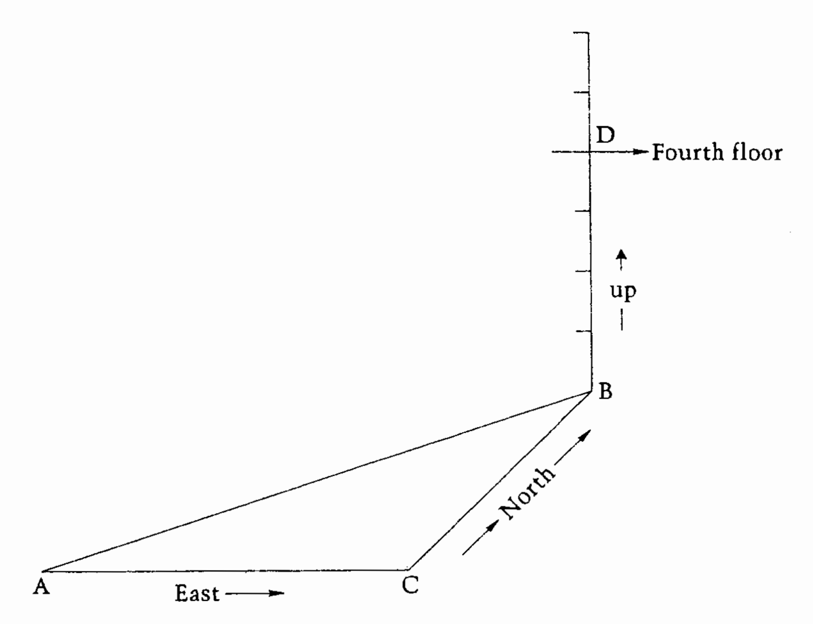


الشكل ٥,٤: المدينةُ الظاهرةُ في الشكل ٥,٣، وقد أُديرَت شوارعُها وطرُقُها المشجّرةُ بمقدارِ ٤٥ درجة.

ومِن اليسيرِ فهمُ ذلك، وهو شيءٌ كان معروفاً مِن قَبْلِ أن يظهرَ آينشتاينُ على المسرحِ بزمنٍ طويل. فلقد تعوّدَ العلماءُ، منذ زمنِ إسحق نيوتن، أن يَصِفوا موقعاً ما، في العالَم الحقيقيِّ، بثلاثِ إحداثياتِ coordinates، أي ثلاثةِ عناصرَ مِن المعلومات. ثم إنهم احتاجوا إلى بَنْدٍ إضافيٍّ آخرَ مِن المعلوماتِ إذا هُم أرادوا أن يحددوا حدثاً ما حدثَ في ذلك المكانِ، وهو **متى** حَدَثَ ذلك. إنَّ عنصرَ المعلوماتِ الإضافيَّ هذا هو إحداثيُّ الزمن.



الشكل ٥,٥: يملكُ المثلثُ ABC زاوية قائمةً في C. ورغمَ أنَّ ضلعيْهِ BC و CA لا يساويانِ الضلعيْنِ المُناظريْنِ للمثلثِ ABC في الشكل ٥,٣، فإنَّ وَتَرَ المثلثيْنِ AB يبقى هو ذاته.



الشكل ٥,٦ : لتحديدِ موقعِ شخصٍ يقطنُ في D، في ناطحةِ سحابٍ تقعُ في B، فإننا نحتاجُ إلىٰ معطياتٍ إضافية، وهي: الطابقُ الذي تقع فيه D.

وتخيّلْ حادثاً يحدثُ لشخصٍ يعبرُ الطريقَ فتصدمُهُ سيارةٌ عابرة. فحتىٰ يحدثَ ذلك الحادثُ المؤسفُ، لا بدَّ أن يكونَ الشخصُ في المكانِ ذاته الذي وُجِدَتْ فيه السيارةُ، **وفي الوقتِ ذاتِه**. وما لَم تتناغم الإحداثياتُ الأربعُ كلُّها، فإنَّ حادثَ الاصطدام سوف لن يحدثَ. ومِن هُنا فإنَّ عالَمَ الأحداثِ الحقيقيَّ يتألفُ مِن **أربعةِ أبعادٍ**، ثلاثَةٌ للمكان وواحدٌ للزمان.

علىٰ أنَّ الإحداثِيَّةَ الرابعةَ، وهي الزمانُ، وكما يُدرِكُ الجميعُ بالبداهةِ، تختلفُ نوعاً ما عن إحداثياتِ المكانِ الثلاثِ. ثم إننا نقيسُ المسافاتِ المذكورةَ في الشكل ٥,٦ كلَّها عَبْرَ الشارعِ، وعَبْرَ الطريقِ المشجّرِ، وصُعوداً في ناطحةِ السحابِ، بالأمتار. ولكننا نقيسُ الزمنَ بالساعاتِ، والدقائقِ، والثواني. فبالنسبةِ إلى قياساتِ المكانِ فإننا نستخدمُ المِترَ، بينما نستخدمُ الساعاتِ لقياسِ الوقت. وهكذا، فإنّ المكانَ والزمانَ، ورغمَ احتياجنا إلىٰ تحديدِها، حتىٰ نُحدِّدَ كُلِّيَةَ «أين» و«متىٰ»، للأحداثِ، فإنهما شيئانِ مختلفان.

ذلك ما اعتقدَهُ نيوتن، عندما حدَّدَ وضعاً تامّاً للمكانِ ووضعاً آخرَ للزمان. فساعاتُ الراصدينَ أينما كانت، وبأيِّ اتجاهٍ تحرّكَتْ، وبأيةِ سرعةٍ، سوف تسجِّلُ الوقتَ بالطريقةِ

ذاتِها. وكذلك فإنَّ هؤلاءِ الراصدينَ سيسجِّلونَ المسافاتِ بالطريقةِ نفسِها، ولسوف يحصلونَ علىٰ النتيجةِ ذاتِها.

لِنتطرَّقْ إلىٰ النسبية الخاصة Special relativity

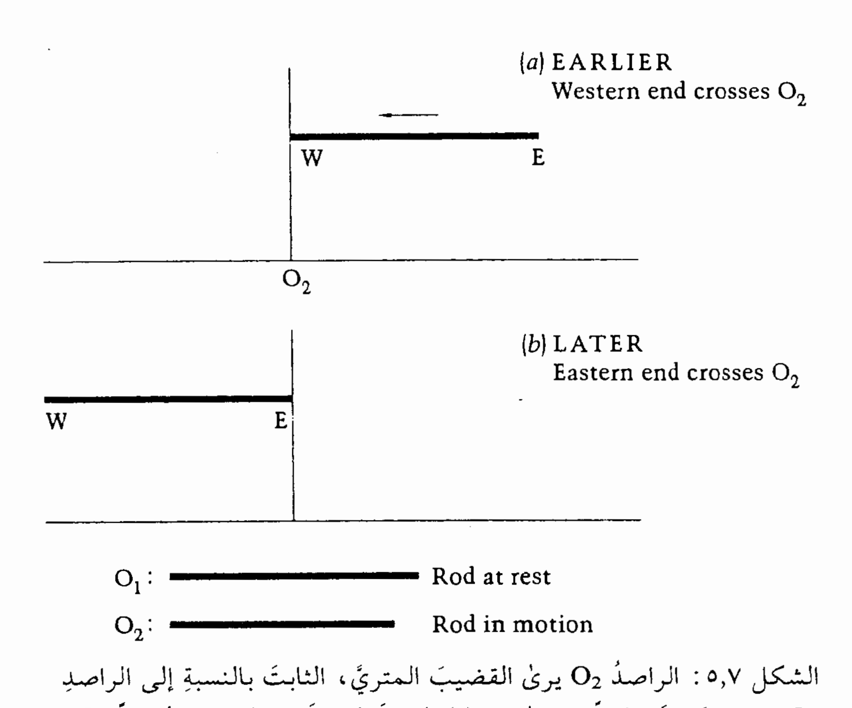
كان المعتقَدُ الذي وصفناهُ قبل قليلٍ هو الفكرة التي اعترضَ آينشتاين عليها وتحدّاها، عندما قام بطرحِ نظريته الخاصةِ حول النسبية special theory of relativity. وإذا ما أردنا أن نصِفَ تفاصيلَ تلك النظريةِ كلّها، فلسوف يستدعي ذلك جهداً مُطوَّلاً منّا، ولُغةً تقنيةً صعبةً، فلننظرْ في الداعي الذي دعا آينشتاين إلىٰ ذلك.

لقد أشَرْنا، في الفصلِ الأولِ، إلىٰ الأبحاثِ التي قامَ بها جيمس كلارك ماكسويل، علىٰ الموجاتِ الكهرومغناطيسية. وعندما قام آينشتاينُ بتفحُّصِ المعادلاتِ الأساسيةِ التي بنىٰ عليها ماكسويل نظريتَه، لاحظَ بأنها تدلُّ ضمناً علىٰ نوعٍ جديدٍ مِن الثبات (عدم التغاير) invariance لمجموعاتٍ معينةٍ مِن أربعةِ أبعادٍ للمكانِ والزمان، وهو ثباتٌ يشبهُ إلىٰ حدٍّ ما ثباتَ المسافاتِ البينيةِ الذي أشرْنا إليه مِن قبلُ، ولكنه يختلفُ عنه نوعاً ما.

ونوضِّحُ هنا ذلك الثباتَ الجديدَ، بمساعدةِ الشكليْن ٥,٧ «أ»، «ب». فلننظرْ في أمرِ الراصدَيْنِ O_1 و O_2، وهما في حركةٍ نسبية. افترِضْ أنّ الراصدَ O_2، وكما يراهُ الراصدُ O_1، يتحركُ شرقاً. عندئذٍ سوف يرىٰ الراصدُ O_2 الراصدَ O_1 وهو يتحركُ **غرباً** وبالسرعةِ نفسها. وعندما يمرُّ أحدُهما بالآخَرِ فإنه يضعُ ساعته علىٰ وقتِ الصفرِ، وتكونُ المسافةُ بينهما حينئذٍ صفراً أيضاً.

والسؤالُ الآنَ هو، ماذا سيجدُ هذانِ الراصدانِ عندما يُقارنانِ قضيبيْهِما المتريَّيْنِ وساعتيْهما؟ فلنأخذِ القضيبيْنِ المتريّيْنِ أولاً. فلنفترضْ أنّ ذلك القضيبَ الذي يبلغُ طولُه متراً واحداً يمتدُّ مُستقِراً باتّجاهِ غربِ ـ شرق، في إطارِ نظَرِ الراصدِ O_1. سوف يمرُّ الراصدُ O_2 علىٰ نهايتيِّ هذا القضيبِ في وقتيْنِ مختلفيْنِ، إذ إنه يمرُّ بنهايةِ القضيبِ الغربيةِ أولاً، ثم بعدَ ذلك بنهايتهِ الشرقية. يلاحظُ الراصدُ O_2 زمن مرورهِ بكلٍّ مِن هذيْنِ، عابراً النهايةَ الغربيةَ أولاً، ثم النهايةَ الشرقيةَ بعد ذلك. يُسجِّلُ الراصدُ O_2 هذيْنِ الزمنيْنِ، ويحسبُ الفرقَ بينهما. وبضربِ سرعةِ الراصدِ O_1 في الفترةِ الزمنيةِ الفاصلةِ هذه يحصلُ الراصدُ O_2 علىٰ طولِ القضيب.

إنَّ العلاماتِ الموجودةَ علىٰ القضيب تُنبئُ الراصدَ O_2 بأنه قضيبٌ متريٌّ، ولِذا يتوجبُ أن يكون القياسُ المذكورُ أعلاهُ «متراً واحداً». ولكنه، بدلاً مِن ذلكَ، يحصلُ

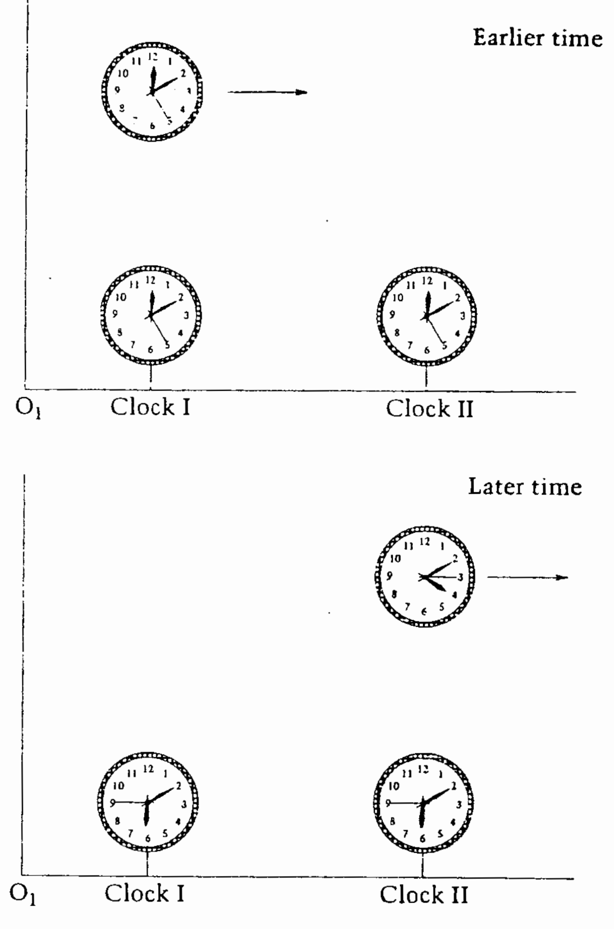


الشكل ٥,٧ : الراصدُ O_2 يرىٰ القضيبَ المتريَّ، الثابتَ بالنسبةِ إلى الراصدِ O_1، وقد انكمشَ قليلاً. ونرىٰ في (a) النهايةَ الغربيةَ مِن القضيبِ مُلاقِيَةً O_2، بينما في (b) تمرُّ النهايةُ الشرقيةُ مِن القضيبِ بالراصدِ O_2 في وقتٍ متأخر.

علىٰ نتيجةٍ تقلُّ قليلاً عن المتر. وبعبارةٍ أخرىٰ، فإنّ **القضيبَ يبدو منكمشاً قليلاً عندما يتمُّ النظرُ إليه مِن راصدٍ متحرّك**.

ونحصلُ علىٰ النتيجةِ ذاتها بالنسبةِ إلى قياساتِ الزمان. افترضْ، وكما يظهرُ في الشكل ٥,٨، أنَّ الراصدَ O_2 يمرُّ بساعتيْنِ ثابتتيْنِ اثنتيْنِ موجودتيْنِ في الإطارِ الثابتِ للراصدِ O_1، واحدةً بعدَ الأخرىٰ. ولمّا كان المراقبُ O_2 يمرُّ بهما في وقتينِ مختلفيْنِ، فإنَّ الساعتيْنِ سوف تُظهرانِ وقتيْنِ مختلفيْنِ. ما هو مدىٰ مشابهةِ هذه الفترةِ الفاصلةِ لِتلكَ التي تسجِّلُها الساعةُ التي يحملُها الراصدُ O_2؟ **لسوف يَتَّضِحُ، مرّةً أخرىٰ، أنَّ الفترةَ الزمنيةَ التي تسجلُها الساعةُ المتحركةُ التي يحملُها الراصدُ O_2 هي أقصرُ بقليلٍ مِن تلك التي تسجّلُها الساعةُ الثابتةُ للراصدِ O_1**. وهكذا فإنَّ الراصد O_1 سيعتقدُ بأنَّ ساعةَ O_2 تدورُ بصورة أبطأ.

وما وصفناهُ إنما هي **تجاربُ فكريةٌ**، ولكنها تعكسُ بالفعلِ كيف يبدو سلوكُ المنظوماتِ الفعليةِ، وسواءٌ أكانَ ذلك في الطبيعةِ أم في المختبرِ الأرضيّ. ولقد أكَّدَتْ،



الشكل ٥,٨ : إنَّ ساعةَ الراصدِ O_2، الذي يتحركُ بالنسبة إلى المشاهدِ O_1، سوف تبدو بطيئةً، بالمقارنةِ مع الساعتيْنِ الثابتتيْنِ بالنسبة إلى الراصدِ O_1.

مثلاً، مراقَبةُ الجسيماتِ سريعةِ الحركة في وابلاتِ الأشعةِ الكونيةِ تباطؤَ الزمنِ. وهو ما يُعرَفُ **بتمدّدِ الزمن time dilatation**، والذي يحدثُ للجسيماتِ المعروفةِ باسم ميو ـ ميسونات μ mesons. إنَّ الميو ـ ميسونَ النموذجيَّ يتحلّلُ، عندما يكونُ ساكناً، في فترةٍ زمنيةٍ تقرُبُ مِن ٢ مايكروثانية. ولكنَّ الميو ـ ميسون الذي يتحركُ سريعاً سوف يتبيَّنُ لنا بقاؤُه لفترةٍ أطول، لأنَّ الساعةَ التي تُعيِّنُ انحلالَ الجسيمةِ تتحركُ بصورةٍ أبطأ (ونحنُ كَمِثْلِ الراصدِ O_1، في التجربةِ الفكرية السابقة). وهكذا يُلاحَظُ أنَّ ميسوناتِ الأشعةِ تدومُ لِما قد يصلُ إلىٰ خمسينَ ضعفاً عن فترةِ الانحلالِ المذكورةِ أعلاه.

ونعني بكلمةِ «السريع» هنا أنَّ الجسيمةَ تتحركُ بسرعةٍ قريبةٍ جداً مِن سرعةِ الضوء. إنَّ تأثيراتِ انكماشِ الطولِ وتمدّدِ الزمنِ لا تُلاحَظُ إلاّ عندما تكونُ السرعاتُ النسبيةُ التي نتحدثُ عنها قريبةً مِن سرعةِ الضوء. أمّا الحركاتُ النموذجيةُ التي نصادفُها في حياتنا اليوميةِ فهي أصغرُ بكثيرٍ مِن أن يمكنَ معها رؤيةُ مِثْلِ تلك الآثار. وكمثالٍ علىٰ ما نقول، إذا كان الراصدُ O_2 مسافراً بطائرةٍ تطيرُ بسرعةِ ١٠٠٠ كيلومترٍ في الساعةِ، فإنَّ تباطؤَ الساعاتِ الذي وصفناهُ سوف لن يكونَ أكثرَ مِن ٥ أجزاءٍ مِن ١٠ آلافِ بليونِ جزء.

ورغمَ ضآلةِ هذه التأثيراتِ في حياتنا اليوميةِ، فإنها ليست مِمَّا يُدْرَكُ أو يُحدَسُ. إننا معتادونَ كثيراً علىٰ اعتبارِ قياساتِ المسافاتِ المكانيّةِ أو الفتراتِ الزمنيةِ قِيَماً مطلقةً بحيثُ إن فكرةَ اختلافها بالنسبةِ إلىٰ راصدينَ مختلفينَ تبدو غريبةً جداً. وهذا هو السببُ في أنَّ النظريةَ الخاصةَ للنسبيةِ قد تمّتْ مقاومتُها، في بدايةِ الأمر، بكلِّ ضراوةٍ، وحتىٰ مِن قِبَلِ الفلاسفةِ والمفكرين عموماً. ولقد فكَّرَ هؤلاءِ بمواقفَ عديدةٍ متناقضةٍ ظاهرياً تُظهِرُ خطأَ أفكارِ قياسِ المكانِ والزمانِ هذه. ولسوف نَصِفُ واحدةً مِن أمثالِ تلك المفارَقاتِ بعدَ قليل.

ولكن فلنَعُدْ إلىٰ معالادتِ ماكسويل. لقد أظهرَ عالِمُ الرياضياتِ هِرمان مِنْكاوسكي بأنّ نتائجَ قياساتِ المكانِ والزمانِ الغريبةَ ظاهرياً تنشأُ بسببِ النظرِ إليها كُلاً علىٰ حِدَة، بدلاً مِن النظرِ إليها باعتبارِها أشياءَ كُلِّيَّةً. ويوضِّحُ المثالُ الذي سُقناهُ عن ممرّاتِ المدينةِ ما عَناهُ بذلك.

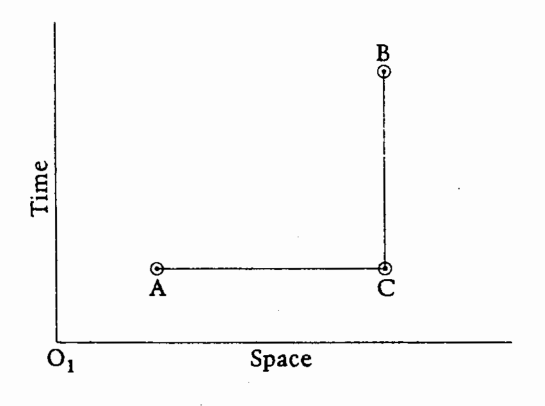
وبالعودةِ إلىٰ الشكليْنِ ٥,٢ و٥,٤، لنفترضْ أننا كنّا نبحثُ في ترتيباتِ الممرّاتِ عن المسافةِ بين A و B، محدّدينَ أنفسَنا بإجراءِ قياساتٍ علىٰ طولِ الطرُقِ المشجّرةِ وحسب، مُهملينَ الشوارعَ العاديّةَ كليّةً. وعندئذٍ، وكما هو في الشكل، فإنَّ السيرَ علىٰ طولِ الطريقِ المشجّرِ سوف يكونُ أطولَ في حالةِ الشكل ٥,٤ منه في الشكل ٥,٢. وهكذا فإنَّ علينا أن نستنتجَ أنّ «المسافةَ» (مَقيسةً علىٰ طولِ الطريقِ المشجّرِ وحسب)، بين A و B، تختلفُ في الحالتيْن.

وواضحٌ أنَّ هذا الاستنتاجَ مغلوطٌ، لأنه يستندُ إلىٰ قاعدةٍ ناقصةٍ لقياسِ المسافاتِ، بإهمالِه الشوارعَ العاديّةَ كليةً. ولو كُنّا أخذْنا الشوارعَ العاديّةَ في الحُسبانِ، ورسمْنا مثلثاتٍ قائمةَ الزاوية، واستخدمْنا نظريةَ فيثاغورس، لاكتشفنا عندئذٍ أنَّ المسافةَ AB لا تعتمدُ علىٰ منظومةِ الشوارعِ العاديّةِ والطرُقِ المشجّرةِ المختارةِ، بل إنها شيءٌ ثابت.

وتقودُنا فكرةُ منكاوسكي خطوةً أخرىٰ إلىٰ الأمام، فهي تنبئُنا بأنّ المسافةَ الثابتةَ الحقيقيةَ بين نقطتيْن في المكانِ والزمانِ ليست مجرّدَ المسافةِ المقيسةِ في الفضاءِ أو الفترةَ الزمنيةَ المقيسةَ بالوقت، **إنها مجموعةٌ مِن الاثنينِ معاً**. وتجيءُ هنا، مرّةً أخرىٰ، نظريةٌ تشبهُ نظرية فيثاغورس، ولكنها تختلفُ عنها قليلاً. وليس مِن العسيرِ أن نفهمَ هذه القاعدةَ الجديدةَ.

ونرىٰ في الشكل ٥,٩ **مخططاً للزّمْكان spacetime diagram**. ويُشيرُ المحورُ الأفقيُّ فيه إلىٰ المكانِ، والعموديُّ إلىٰ الزمان. وفي الحقيقةِ فإنَّ المكانَ ذاتَه يحوزُ ثلاثةَ أبعادٍ، ولكننا لا يمكنُنا أن نرسمَ الأبعادَ الثلاثةَ كلها علىٰ ورقةٍ مسطّحة. علىٰ أنَّ نقطةَ الضعفِ هذهِ لا تُعيقُ مِن فهمِنا للقاعدةِ الجديدةِ لقياسِ المسافةِ بين النقطتيْنِ A و B في الزمكان. ولنلاحظْ بأنّنا عندما نضعُ النقطةَ A في هذا المخططِ، فإننا نصِفُ موقعَ **الحدَثِ event** في المكانِ **بالإضافةِ إلىٰ** حقبتِهِ مِن الزمان. وينطبقُ الأمرُ ذاتُه علىٰ النقطةِ B. ولذا فإننا نقيسُ المسافةَ الفاصلةَ ما بين الحدثيْنِ، بالإضافةِ إلىٰ الفترةِ الزمنيةِ الفاصلةِ بينهما.

ومثلما كان لنا مثالٌ مع منظومةِ الشارعِ ـ الطريقِ المشجّرِ، فلنتخيّلِ الآنَ المخططَ المرسومَ في الشكل ٥,٩، والذي تتعامدُ فيه خطوطٌ أفقيةٌ وعمودية، حيثُ تمثّلُ الأولىٰ ثابتَ الحقبةِ الزمنيةِ، وتمثّلُ الثانيةُ ثابتَ الموقعِ المكانيِّ. إنَّ خطّاً أفقياً يمرُ عَبْرَ A سوف يتقاطعُ مع خطٍّ عموديٍّ عَبْرَ B في النقطةِ C، مثلمَا حدثَ معنا في الشكلِ ٥,٣. وكالسابقِ، فإنَّ لدينا المثلثَ ABC، وفيه الزاويةُ القائمةُ، ظاهرياً، في C. ونقولُ «ظاهرياً» لأننا لم نحدِّدْ في الحقيقةِ كيفيةَ قياسِ زاويةٍ بين خطِّ الزمانِ وخطِّ المكان. وفي الحقِّ، فإنَّ القاعدةَ الجديدةَ التي تنبئُنا بكيفيةِ قياسِ المسافةِ AB سوف تكونُ مختلفةً عن نظريةِ فيثاغورسَ المعتادة. والقاعدةُ هي كالآتي:



الشكل ٥,٩: مخطَّطٌ للزمكان spacetime diagram، وتظهرُ فيه أحداثٌ ثلاثة. ويمتلكُ الحدَثانِ A و C الحقبةَ الزمنيةَ ذاتها، بينما يمتلكُ الحدَثانِ B و C الموقعَ المكانيَّ ذاته، مقيساً مِن قِبَلِ الراصدِ O_1.

اضربِ الفتراتِ الزمنيةَ كلّها في سرعةِ الضوءِ حتىٰ تصبحَ الآنَ مقيسةً بوحداتِ المسافة. ويُعَرَّفُ مُرَبَّعُ AB بأنه بساوي **الفرقَ** بين مربعيّ AC و CB. إنَّ «الفاصلَ» بين أيِّ حدثيْنِ معَرَّفيْنِ بهذه الطريقةِ هو كميةٌ ثابتةٌ بالنسبة إلىٰ إطاراتِ المكانِ ـ الزمانِ التي يستخدمُها كلُّ المراقبينَ بحركةٍ نسبيةٍ منتظمةٍ بالنسبةِ إلىٰ إحدِهما الآخَرِ.

ونعودُ إلىٰ المثالِ الذي ضربناهُ عن الراصديْنِ O_1 و O_2، وهما في حركةٍ نسبيةٍ منتظمة. افترضْ أنّ الشكلَ ٥,٩ يمثّلُ للراصد O_1 **مخططَ** الزمكانِ. ما هو وجهُ المقارنةِ بينه وبين مخططِ الزمكانِ العائدِ للراصدِ O_2؟ إننا إذا سِرْنا حَسَبَ مِثالِ منظومةِ الممرّيْنِ الاثنينِ في الشكليْنِ ٥,٢ و٥,٤، لوجدْنا أنّ خطوطَ ثابتِ الزمانِ وثابتِ المكانِ للراصدِ O_2 سوف تكونُ مائلةً بالنسبةِ إلى تلكَ التي نراها في الشكل ٥,٩. وهكذا ستكونُ الفترتانِ AC و AB مختلفتيْنِ عمّا هو في الشكل ٥,٩ .**ولكننا إذا ما استخدمْنا السابقةَ، لقياسِ الفاصِلِ AB، لحصلْنا علىٰ الجوابِ ذاتِه في الحالتينِ كلتيهما.**

ولو استخدمْنا الآنَ فكرةَ الجمعِ بينَ المكانِ والزمانِ، وحدّدْنا الفاصلَ الثابتَ بالشكلِ المذكورِ أعلاهُ، لوجدْنا أنّ المعادلاتِ الماكسويليةَ للنظريةِ الكهرومغناطيسيةِ تبدو واحدةً لكلِّ هؤلاءِ الراصدينَ المتحركين. أي أنّ الراصدينَ كلَّهُم الذينَ هُم في حركةٍ نسبيةٍ ثابتةٍ، بالنسبةِ إلىٰ أحدِهم الآخرِ، سوف يصلونَ إلىٰ التركيبةِ الأساسية formal structure ذاتِها، لهذه المعادلاتِ، مِن تجارِبهم. ولن نحصلَ علىٰ مثلِ هذا التماثلِ **إلاّ إذا** استخدمْنا تعديلَ نظريةِ فيثاغورس المذكورَ أعلاه. ولقد كان ذلك هو الحافزَ الذي قادَ آينشتاينَ إلىٰ هذه الطريقةِ المستحدثةِ في الجمعِ بين المكانِ والزمانِ في كيانٍ واحد. وسوف نشيرُ، مِن الآنَ فصاعداً إلىٰ هذا الكيانِ الجامعِ باعتباره **الزَّمْكان spacetime**، وهو يمتلكُ أربعةَ أبعادٍ، بعدٌ منها للزمانِ، وثلاثةٌ للمكان.

سرعةُ الضوء

إنَّ طريقةَ التفكيرِ التي شرحناها قبل قليلٍ تُكسِبُ سرعةَ الضوءِ موقعاً خاصاً جداً. ذلك لأنّ مِن نتائجِ معادلاتِ ماكسويل أن تسيرَ الموجاتُ الكهرومغناطيسيةُ بسرعةِ الضوء. وذلك يعني، بالنسبةِ إلى كلِّ الراصدينَ الذين هم في حركةٍ نسبيةٍ منتظمةٍ بالنسبةِ إلىٰ بعضهم البعض، أنَّ سرعةَ الضوءِ تبدو لهم واحدةً. وإذا ما تقبّلنا المقدمةَ المنطقيةَ الأساسيةَ مِن تماثلِ المعادلاتِ الكهرومغناطيسيةِ لأمثالِ هؤلاءِ الراصدينَ، فإنَّ النتيجةَ المذكورةَ عاليَهُ سوف تبدو طبيعيةً لنا. ولكنها تؤدي أيضاً إلىٰ بعضِ النتائجِ التي هي ضدَّ

البداهةِ. وهاكَ مثالاً نموذجياً، مأخوذاً مِن خِبراتِنا الاعتيادية، يوضّحُ هذه الصعوبة.

افرضْ أنكَ تسافرُ علىٰ متنِ قطارٍ يسير بسرعةِ ١٠٠ كيلومترٍ في الساعة، فإذا ما اقتربَ منكَ قطارٌ آخَرُ يسيرُ بسرعةِ ١١٠ كيلومتراتٍ في الساعةِ، مثلاً، فإنه سوف يبدو قادماً بسرعةٍ بالغةٍ، ذلك لأنَّ سرعتَه الفعليةَ نحوكَ ستكونُ حينئذٍ ١٠٠+ ١١٠، أي ٢١٠ كيلومتراتٍ في الساعة. ولسوف يتجاوزُكَ هذا القطارُ في انطلاقتِه السريعةِ مِن دونِ أن تُلاحظَ تفاصيلَ شبابيكِ العرباتِ، والناسَ في داخلِ العربات، إلخ. ولكنكَ لو رأيتَ القطارَ نفسَه يتبعُ قطارَكَ ثم يتجاوزُه، فلسوف تراهُ حتماً بكلِّ تفاصيلِهِ، بينما هو يزحفُ نحوَ قطارِكَ ثم يتخطّاهُ ببطءٍ، وستكونُ سرعتُه الفعليةُ التي يتجاوزُ بها قطارَكَ ١٠ كيلومتراتٍ في الساعةِ لا غير، لأنَّ هذا الرقمَ هو الفرقُ ما بين سرعتَيِّ القطاريْنِ. وهكذا سوف تبدو سرعةُ القطارِ كبيرةً جداً في حالةٍ ما، وصغيرةً جداً في الحالةِ الأخرىٰ. وهذا المثالُ نموذجيٌّ مِن حيثُ أَنَّ السرعةَ الظاهريةَ للقطارِ الثاني تعتمدُ علىٰ حقيقةِ إنْ كان مقترباً منك أو مبتعداً عنك.

واستعِضْ بالضوءِ بدلاً مِن القطارِ الثاني، ولسوف تدركُ المعضلةَ. ذلك لأننا قد توصلْنا توّاً إلىٰ استنتاجِ أنّ **سرعةَ الضوءِ سوف تكونُ هي ذاتها، وسواءٌ أكُنْتَ مقترباً منها أو مبتعداً عنها!**

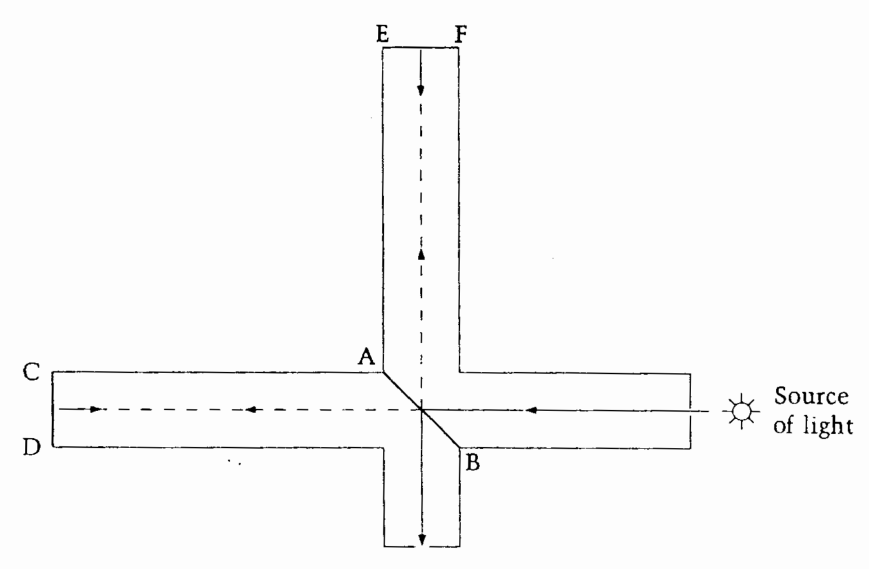
ولقد أوضَحَتْ تجربةٌ تاريخيةٌ مهمةٌ سلوكَ الضوءِ الغريبِ هذا للفيزياويينَ، رغمَ أنهم لم يدركوا أهميتَهُ حتىٰ بعدَ ظهورِ نظريةِ النسبيةِ الخاصة. وباختصارٍ، فلقد كانت الظروفُ كالتالي: كان ثَمَّةَ اعتقادٌ عامٌّ، في القرنِ التاسع عشرَ، بأنَّ موجاتِ الضوءِ تحتاجُ إلىٰ وسطٍ يمكِّنُها مِن أن ترتحلَ فيه، وهو اعتقادٌ عَزّزتْهُ أمثلةٌ أخرىٰ معتادةٌ لحركةِ الموجة، مثلَ موجاتِ الماءِ التي تسيرُ فيه، وموجاتِ الصوتِ، وهي تحتاجُ أيضاً إلىٰ وسطٍ ناقلٍ، كالهواءِ، والماء، إلخ. وكان هناك توقّعٌ بوجودِ وسطٍ رقيقٍ عُرِف **بالأثير** **aether** (=ether)[1]، وأنه موجودٌ في كلِّ مكانٍ، ويضطربُ عند مرورِ الضوءِ فيه. هل يمكنُنا أن نكشفَ عن وجودِ الأثيرِ، بقياسِ سرعةِ الأرضِ بالنسبة إليه، مثلاً؟

قامَ العالِمانِ ميكلسِنْ ومورْلي، مِن خلالِ استنتاجاتٍ وبراهينَ تشبهُ تلك التي ذكرْناها

---

(١) جاء في معجم «وبستر» الإنكليزي الشهير عن الأثير aether، بأنه وسطٌ صلبٌ أو شبهُ صلبٍ مطّاطٍ تماماً، وافتُرِضَ سابقاً بأنه يسودُ الفضاءَ كلَّه وأنه مسؤولٌ عن نقلِ الضوءِ والحرارةِ والجاذبيةِ وكلِّ أشكالِ الجاذبية والإشعاع. د.س

في مثالِ القطاراتِ، بعملِ تجربةٍ حسّاسةٍ جداً، للكشفِ عن هذه السرعة (يبيّنُ الشكلُ ٥,١٠ شرحاً لتلك التجربة). ولمّا كانتِ الأرضُ تدورُ مِن الغربِ إلىٰ الشرق، فإننا نتوقعُ أنّ أشعةَ ضوءٍ ترتحلُ راجعةً مِن الشرق إلىٰ الغربِ سوف تستغرقُ وقتاً أطولَ بقليلٍ مِن الضوءِ الراجعِ، وبالمسافة نفسها، مِن الشمالِ إلىٰ الجنوب. وبالمِثْلِ، يمكنُ لنا أن نُظهِرَ بأنَّ النُوتيَّ الذي يجذِّفُ بسرعةٍ ثابتةٍ بالنسبةِ إلى سطحِ الماءِ يحتاجُ إلىٰ وقتٍ أقصرَ، لعبورِ نهرٍ يبلغُ عَرضهُ d ثم العودة، مِن أن يسيرَ المسافةَ d ذاتَها **علىٰ طولِ** النهرِ ثم العودةَ.



الشكل ٥,١٠: يسقطُ الضوءُ، في تجربةِ ميكلسن ومورلي (مِن مصدرٍ علىٰ اليمين)، في جهازِ ميكلسن، علىٰ المرآةِ AB التي تعكسُ الضوءَ جزئياً وتنقلُه جزئياً. فأمّا الجزءُ المنعكِسُ مِن الضوءِ فإنه يتجهُ إلىٰ الأعلىٰ ثم ينعكسُ راجعاً مِن قِبَلِ المرآةِ EF. وأمّا الجزءُ المنقولُ منه فإنه يسيرُ في اتجاههِ الأصليِّ ثم ينعكسُ راجعاً مِن قِبَلِ المرآةِ CD. ويعودُ الجزءانِ إلى الاتّحادِ مجدّداً، ويراهُما المشاهِدُ مِن الشّقِّ الأسفل. وفي الحالةِ القصوىٰ، عندما تسقطُ ذُرواتُ الموجتيْنِ، فإنَّ الضوءَ الكليَّ يتضاعفُ، بينما تحذِفُ إحدىٰ الموجتيْنِ الأخرىٰ في الحالاتِ القصوىٰ المعاكسة. وعلىٰ العمومِ، فإنَّ المشاهِدَ يرىٰ سلسلةً مِن الأهدابِ المعتمةِ والساطعة. ويعتمدُ نموذجُ تداخلِ الموجتيْنِ علىٰ المسافةِ التي تقطعُها كلُّ موجةٍ، إضافةً إلىٰ سرعةِ الضوء. ولمّا كان ذراعا المِدخالِ[1] متساويينِ في الطولِ، فإنَّ مِن الممكنِ استخدامَ الانحرافاتِ في أهدابِ ذرواتِ التداخلاتِ للكشف عن التغيرات الطفيفةِ في سرعة الضوء. ولقد استخدمَ ميكلسن ومورلي هذه الطريقةَ لقياسِ الفارقِ المتوقعِ في زمنِ ارتحالِ الضوءِ بالاتجاهاتِ شمال ـ جنوب، وشرق ـ غرب. وقد فشلا في العثور علىٰ أيِّ فرق.

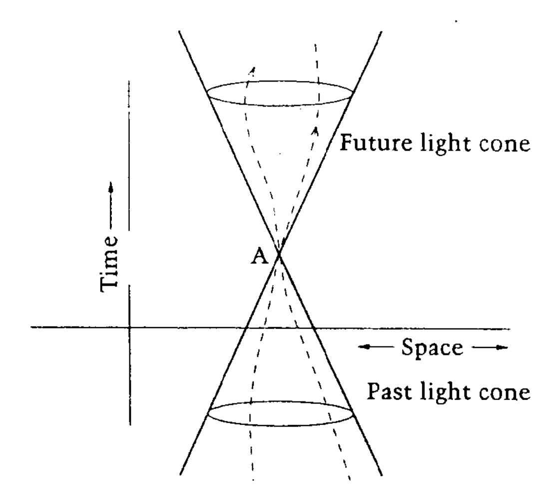
---

(١) المدخال = مقياس التداخل interferometer: أداةٌ تستخدمُ ظواهرَ التداخل الضوئي لتحديدِ طول الموجة ومُعاملِ الانكسار. د.س

ورغمَ الجهودِ العديدةِ التي بُذِلَت للكشفِ عن هذا الفرقِ الضئيلِ فلقد فشلَتْ تلكَ الجهودُ في إيجادِ أيِّ فرق. ويكمنُ سببُ ذلك، وهو ما عرفناهُ الآنَ مِن نظريةِ النسبيةِ الخاصةِ، في أنّ سرعةَ الضوءِ سوف تبدو هي ذاتَها في ظلِّ تلك الرِّحلات، ومهما كان اتجاهُ دورانِ الأرضِ حول نفسها.

ويتّضحُ لنا أيضاً ما للضوءِ مِن مكانةٍ خاصةٍ، في نظريةِ النسبيةِ، في الشكل ٥,٩. افرضْ أنّ الحدثَيْنِ A و B موجودانِ بشكلٍ يتّصلانِ به بوساطةِ أشعةٍ للضوء، أي أنَّ أشعةَ الضوءِ مِن A تمرُّ عبرَ B. ثم نجعلُ الطوليْنِ AC و CB متساوييْنِ، وهكذا فإنّ قياسَ AB يساوي صفراً. ولمّا كان ذلك ثابتاً بالنسبة إلى كلِّ المراقبينَ، فإنَّهم سيرونَ كلَّهم الضوءَ متحركاً بالسرعةِ ذاتها، ومهما كان اتجاهُه.

ويصفُ الشكلُ ٥,١١ هذه النتيجةَ عَبْرَ فكرةِ **المخروطِ الضوئيِّ light cone**. فإذا ما أرسلْنا بعددٍ مِن الإشاراتِ الضوئيةِ باتجاهاتٍ مختلفةٍ مِن النقطةِ A في الزّمْكان، فإنها سوف تسيرُ كلّها إلىٰ الخارجِ علىٰ مساراتٍ منحنيةٍ trajectories تقعُ علىٰ مخروطٍ يُعرَفُ **بمخروطِ المستقبل future light cone** لِـ A. كما أنّ أشعةَ الضوءِ المشابهةَ، والمقتربةَ مِن الاتجاهاتِ كلّها، تقعُ علىٰ **مخروطِ ضوءِ الماضي past light cone** الذي يعودُ لِـ A. ولمّا كانت نظريةُ النسبيةِ تؤدي بنا أيضاً إلىٰ استنتاج أنه لا يمكنُ لجسيمة مادةٍ أن تسيرَ بسرعة الضوء، فإنّ مِثْلَ هذه الجزيئاتِ كلِّها، والتي ترتحلُ مِن النقطة A، سوف تكونُ لها مساراتٌ تقعُ داخلَ مخروطِ ضوء المستقبل لِـ A. إننا نتوقعُ، في العادةِ، أنّ العملياتِ الفيزياوية تتبعُ قاعدةَ العِلِّيَة (السببية) principle of causality، أي أنّ الأسبابَ تسبقُ النتائج. ولأنه لا يمكنُ لأيِّ عملٍ فيزياويٍّ أن يسيرَ بسرعةٍ تفوقُ سرعةَ الضوءِ، فإنَّ



الشكل ٥,١١: تظهرُ هنا مخروطاتُ ضوءِ المستقبلِ والماضي، مِن نقطةِ الزّمْكانِ العامةِ، A. وسوف يكونُ لأيِّ جسيمةٍ مادةٍ مبتعَثةٍ مِن A، مسارٌ **في داخل** مخروطِ ضوءِ المستقبلِ، وكما يظهر من الخط المتقطع.

بإمكاننا أن نخطوَ خطوةً أخرىٰ فنقولَ بأنَّ **كلَّ الآثارِ السببيةِ all causal effects** مِن A سوف تقعُ في داخلِ أو علىٰ مخروطِ ضوءِ المستقبَلِ مِن A. أي أنه ليس لفعلٍ فيزياويٍّ، كائناً ما كانَ، أن يسيرَ بأسرع من الضوء.

وتُدعىٰ المساراتُ المنحنيةُ لجسيماتِ المادةِ، في مخطّطِ الزَّمْكان، **بخطوطِ الوجود worldlines**. وتسيرُ أشعةُ الضوءِ، علىٰ طولِ نِقاطِ الانفصالِ التي تساوي صفراً zero separation، ولذا فهي تُعرَفُ **بخطوطِ الخمود null lines**.

ولقد كان مِن العسيرِ جداً فهمُ حدِّ سرعةِ الضوءِ هذا، في بدايةِ الأمر، لأنَّ الأفكارَ النيوتنيةَ لم تضعْ أيَّ حدٍّ كهذا. ولكنْ، وعلىٰ الرغمِ مِن ذلك، يمكنُ للمرءِ أن يُظهِرَ، مِن خلالِ الالتزامِ بقواعدِ النسبيةِ الخاصةِ لقياساتِ الحركةِ والزَّمْكان، بأنّ المواقفَ المتضادَّةَ تنشأُ إذا ما سمحْنا بنقلٍ للمعلوماتِ بما هو أسرعُ مِن الضوء. وتوضّحُ الأبياتُ الفكاهيةُ المشهورةُ موقفاً كهذا:

كانت هناك فتاةٌ اسمُها الآنسةُ
وضّاءة تسيرُ أسرعَ مِن الضوء
سافَرَتِ اليومَ علىٰ الطريقةِ الآينشتاينيةِ
ثم عادت ليلةَ أمسِ.

مُفارَقَةُ الساعة The clock paradox

لقد بقيَ وجهٌ واحدٌ لراصدينا، مِمَّنْ هُم في حركةٍ نسبيةٍ منتظمةٍ، لم نوضحهُ بعْدُ. وحسبَ نظريةِ النسبيةِ الخاصةِ، فإنهم يتألفونَ مِن صنفٍ خاصٍّ مِن المراقبِين، وهم يُعرَفونَ **بالمراقبينَ الخاملِين inertial observers**، فمَنْ هم أولئك المراقبونَ الخاملون؟

عندما كوّنَ إسحقُ نيوتن أفكارهُ حول الحركةِ، في القرنِ السابع عشر، فلقد جاء بثلاثةِ قوانين. ويقول قانونُ الحركةِ الأولىٰ، الذي يهمّنا هنا، بأنّ الجسمَ الماديَّ يستمرُ علىٰ حالهِ في السكونِ أو الحركةِ المنتظمةِ ما لمْ يتعرّضْ إلىٰ فعلِ قوّةٍ خارجية. وهكذا فإننا نعرِّفُ مُراقبَنا الخاملَ بأنه لا فِعلَ لقوةٍ خارجيةٍ عليه. ويستمرُ أمثالُ هؤلاءِ المراقبينَ كلُّهم علىٰ الحركةِ، بِسُرَعٍ منتظمةٍ بالنسبةِ إلىٰ أحدِهم الآخَر.

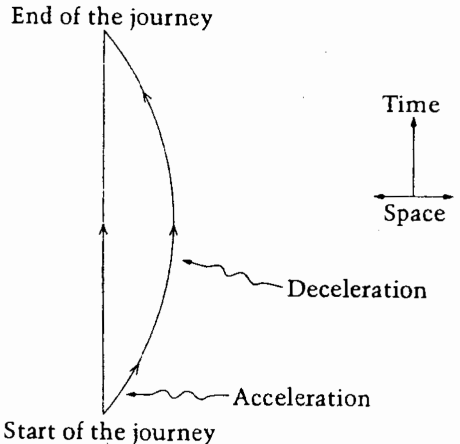
ولقد أظهرَتْ مفارَقةٌ، أي متناقِضَةٌ ظاهريةٌ، وهي طُرِحَتْ في الأيامِ الأولىٰ مِن ظهورِ نظريةِ النسبيةِ الخاصةِ، دَوْرَ المراقبِ الخاملِ جليّاً. وقد وَلَّدَتْ هذه المفارَقةُ التي تُعرَفُ **بمفارقةِ الساعةِ clock paradox**، أو **متناقضةِ التوائم twin paradox** مناقشاتٍ

طويلةً بين العلماءِ والفلاسفة. ويجدرُ أن نُشيرَ إليها هنا بإيجاز.

يقومُ التوأمانِ A و B بإجراء تجربةٍ، ويبقىٰ A في الدار، بينما يرتحلُ توأمُه B مِن الدار بسرعةٍ قريبةٍ جداً مِن سرعةِ الضوء (ولكنْ، بالطبع، غيرِ مساويةٍ لها)، في رحلةٍ في الكونِ تدومُ عِدَّةَ أيام بحسابِ الساعةِ التي يحملُها، وهو يقطعُ مسافةً بعيدةً خلالَ هذه الفترةِ وبالسرعةِ ذاتِها، ثم هو يُبطِئُ مِن سرعتهِ حتىٰ يتوقّفَ ثم يستعيدُ سرعتَه ويعود. وفي كلٍّ مِن رحلتيِّ الذهابِ والعودةِ، فإنه كان يسيرُ، معظمَ الوقتِ، بسرعةٍ تقرُبُ جداً مِن سرعةِ الضوء، وحسبَما يقيسُه توأمُه A. ولذا فإنّ ساعتَه، أي ساعةَ B، تسيرُ بطيئاً جداً بالنسبة إلى ساعةِ A. وهكذا فإنَّ B يجدُ عند عودتِه أنّ توأمَه A قد شاخَ (وكذلك كلُّ مَن هو علىٰ سطح الأرض)، وزادَ عمرُه أعواماً عديدة.

أين هي المفارَقةُ في كلِّ هذا؟ حسناً، فلننظرْ إلىٰ التجربةِ كلها، مِن وجهةِ نظرِ التوأم A. إنه يرىٰ توأمَه B يُقلِعُ بسرعةٍ عاليةٍ جداً ثم يعودُ بسرعةٍ عالية. ثم، وبالمنطقِ ذاتِه، أوَلَمْ يَشِخْ A بالنسبةِ إلىٰ B؟ إنّ عليهما أن يقرّرا هذه الحقيقةَ، بعد إكمالِ التجربة، بشكلٍ أو بآخر. إذاً، فأيُّ التوأميْنِ يعودُ أصغرَ عمراً مِن الآخرِ، ولماذا؟

قد يبدو، في ظاهرِ الأمرِ، أنَّ تجربتي A و B كانتا متماثلتيْن. ولكنها ليست كذلك، في حقيقةِ الأمر، إذ إنَّ التوأمَ A يتمتعُ بمواصفاتِنا للمُراقبِ الخامل، بينما أنَّ التوأمَ B ليس كذلك. يقومُ B أولاً بزيادةِ سرعته حتىٰ يصلَ إلىٰ سرعتِه الفائقة، ثم إنه يُبطِئُ بعد ذلك حتىٰ تصلَ سرعتُه إلىٰ الصفر، ثم يزيدُ منها عند رجوعه حتىٰ تصلَ سرعتُه الضِّدَ مِن قيمتها الأصلية، ويتباطأُ في نهاية المطاف حتىٰ يتوقفَ علىٰ سطحِ الأرض. **وهكذا فإنَّ B ليس بالمراقبِ الخامل**. ويرينا الشكل ٥,١٢ خطوطَ وجودِ التوأميْنِ معاً، لإظهارِ هذا الفرق.



الشكل ٥,١٢: مفارقةُ التوأميْنِ: إنّ خطَّ وجودِ التوأمِ A مستقيمٌ، بينما أنَّ خطَّ وجودِ التوأمِ B مُنحَنٍ، وهو ما يبينُ بأنه ليس مُراقِباً خاملاً.

وحتىٰ نرىٰ ما الذي يحدثُ للتوأمِ B، وحتىٰ ننظرَ مِن خلالِ عينيهِ أيضاً، يتوجبُ علينا أن نأخذَ بنظر الاعتبارِ هذه التغيّراتِ في السرعة. وإننا لنجدُ أننا، وكيفما حسبْنا الجوابَ، نحصلُ علىٰ الجوابِ ذاتِهِ، وهو أنّ التوأمَ A أكبرُ عمراً مِن التوأمِ B.

المكانُ والزمانُ والجاذبية

جاء آينشتاينُ، بعد عشرةِ أعوامٍ مِن تقدّمهِ بنظرية النسبية الخاصة، بتمرينٍ نظريٍّ هو أخطرُ وأشَدُّ عمقاً وتأثيراً، وهو ما صارَ يُعرَفُ **بالنظرية العامة للنسبية general theory of relativity**. ولقد تطرّقَ آينشتاينُ، في هذهِ النظريةِ، إلىٰ بعضٍ مِن القضايا البارزةِ المتعلقةِ بالجاذبية.

ويمتلكُ قانونُ الجاذبيةِ الذي اقترحَهُ إسحٰقُ نيوتن[١]، في القرنِ السابع عشر، سِماتِ النظريةِ العظيمة، فلقد كان قانوناً بسيطاً في صياغته، ولكنْ ذا طيفٍ واسعٍ في تطبيقاته. وقد أثبتَ نجاحَهُ في توضيحِ الظواهرِ علىٰ المستوىٰ الأرضيِّ، وداخلَ المنظومةِ الشمسيةِ، وكذلك في توزيعِ النجوم. علىٰ أنه قد صارَ مِن الواضحِ، ومع مجيءِ العقدِ الأوّلِ مِن القرنِ العشرين، أنَّ النظريةَ النيوتنيةَ ليست، وعلىٰ أفضلِ تقديرٍ، إلاّ تقريباً لنظريةٍ أوسعَ للجاذبية، وأنَّ فيها فجواتٍ تحتاجُ إلىٰ الحلّ.

وهاكَ معضلتيْنِ مِن هذا القبيل، وقد وضَعَتْ أولاهُما النظريةَ النيوتنيةَ في تناقضٍ مباشرٍ مع النظريةِ الخاصةِ للنسبية. نحن نتذكرُ بأنّ النظريةَ الخاصةَ تضعُ حدّاً لسرعةِ انتقالِ أيِّ تأثيرٍ فيزياويٍّ مِن نقطةٍ إلىٰ أخرىٰ في المكان، وسرعةُ الضوءِ هي هذا الحدُّ. ولكنَّ قانونَ الجاذبيةِ لنيوتن لا يحترمُ حدّاً كهذا، إذ إنَّ تأثيرَ الجاذبيةِ عَبْرَ المكانِ ينتقلُ **حالاً**. ولقد أعطىٰ هِرْمان بوندي مثالاً علىٰ مِثْلِ هذا التناقضِ مع النسبيةِ، مِن خلالِ التجربةِ الذهنيةِ التالية.

تصوّرْ موقفاً تختفي فيه الشمسُ فجأةً، بتأثيرِ السِّحْر. هل سوف نلاحظُ تأثيرَ هذهِ الجائحةِ عندما نكونُ موجودينَ علىٰ سطح الأرض؟ لمّا كان ضوءُ الشمسِ يحتاجُ إلىٰ

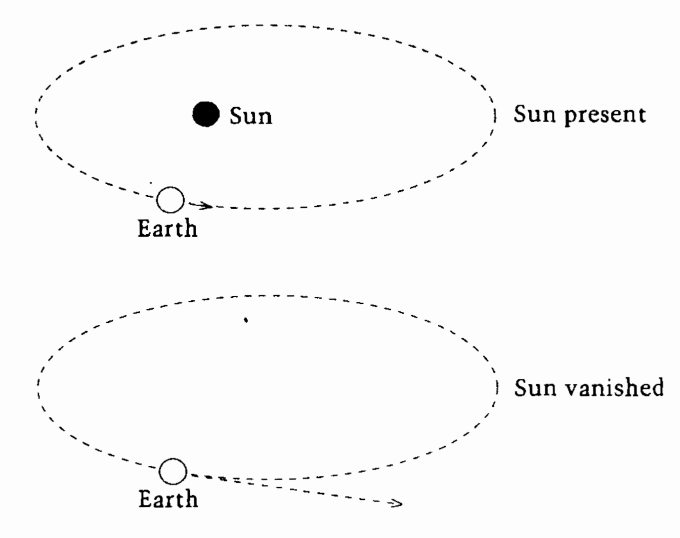
---

(١) إسحق نيوتن هو من أعظم علماء العصر الحديث قاطبة. وكان نيوتن مؤمناً مُوحِّداً. «لقد وجد نيوتن بأن المسيح نبيٌّ آخرُ كموسى، وأن عبادة المسيح كمساوٍ لله ضربٌ من الوثنية والإشراك. وإذاً فلم يكن إسحق مسيحياً أبداً، لكنه أخفى رفضه لمنطق الثالوث. وقال: إن الله في كل مكان.. في كل المواضع إلا الكنيسة» ـ نيوتن للمبتدئين، لوليم رانكين، المجمع الثقافي ومؤسسة الانتشار العربي، بيروت، ط١، ١٩٩٩، ص ١١٦ ـ ١١٧. د.س

حواليٰ ٥٠٠ ثانيةٍ للوصولِ إلىٰ الأرضِ، فإننا سنلاحظُ غيابَ الشمسِ مِن السماءِ بعدَ ٥٠٠ ثانيةٍ مِن هذا الحَدَثِ. ولكنْ، لو كانت نظريةُ جاذبيةِ نيوتن صحيحةً، فإننا سنلاحظُ انعدامَ انجذابِ الأرضِ نحو الشمسِ فَوْرَ حدوث هذا الحدث، ولسوف تتوقفُ الأرضُ عن الحركةِ في مَدارِها البيضاويِّ وتتخذُ اتجاهاً لِخَطٍّ مُماسٍّ، وكما يظهرُ لنا في الشكل ٥,١٣. وهكذا فإننا سوف نحسُّ بهذا التغيّرِ في حركةِ الأرضِ حتىٰ والشمسُ لا تزالُ مرئيةً لنا.

وبالطبع، فإنَّ الشمسَ، في حقيقةِ الأمر، لا يمكنُ أن تختفي فجأةً. إنّ قانونَ حِفظِ المادة والطاقة conservation of matter and energy ينبئُنا بأنْ لا شيءَ يمكنُ أن يختفيَ، وبكلِّ بساطةٍ، من الوجود. علىٰ أننا يمكنُ أن نُعيدَ صياغةَ الموضوعِ بالقولِ بأنّ الشمسَ قد حدثَ لها تغيّرٌ في الشكلِ، أو أنها قد اصطدمتْ بنجم عابر. ومهما حدثَ مِن شيءٍ فلسوفَ نُحَسُّ بتأثيرِ ذلك في جاذبيتها، في الأرض، قبْلَ رؤيةِ الحدثِ الفعليِّ بـ ٥٠٠ ثانيةٍ. ولكنْ قد يمكنُ لنظريةٍ أكثرَ توافقاً أن تجعلَ الآثارَ الجاذبيةَ تسيرُ بسرعةِ الضوء، بحيثُ يُلاحَظُ التأثيرُ البصريُّ والجاذبيُّ في الوقتِ ذاته.

أمّا المعضلةُ الثانيةُ فقد نشأتْ مِن تعريفِ المراقبينَ الخاملينَ ذاتِه. وهؤلاءِ هم الذين لا يشعرونَ بأيةِ قوةٍ خارجيةٍ تؤثّرُ فيهم أبداً. **ولكنْ، هل يمكنُ أن يوجدَ أمثالُ هؤلاءِ المراقبينَ قطُّ؟** لو نظرْنا إلىٰ الموضوعِ بتمعّنٍ أكبر لوجدْنا أنَّ هناك قوةً واحدةً موجودةً



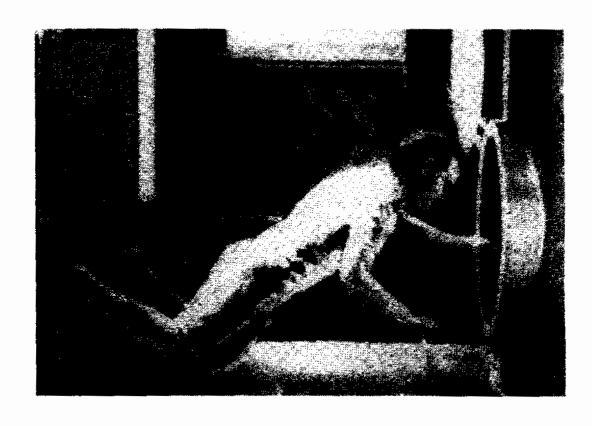
الشكل ٥,١٣: لو كانت الشمسُ ستختفي فجأةً، فإنَّ الأرضَ سوف تبتعدُ عنها باتجاهِ مُماسٍّ لمدارها.

دائماً، وفي كلِّ مكان. وحتىٰ لو كانت ضئيلةً فإنها لا يمكنُ محوُها أو الاستتارُ منها، وهي قوةُ الجاذبيةِ. إنَّ الكونَ الحقيقيَّ ليس فارغاً في كلِّ وفي أيِّ مكان. وهكذا فإنَّ المراقبينَ الخاملينَ، وهم شيءٌ أساسيٌّ في نظريةِ النسبيةِ، ليس لهم مِن وجودٍ في حقيقة الأمر.

فلنتذكّرْ صورةَ الملاَّحِ الفضائيِّ الذي يطوفُ طليقاً داخلَ المركبة الفضائية Space Shuttle (انظرْ الشكل ٥,١٤). هل هي حالةٌ لانعدامِ الجاذبيةِ؟ كلاّ. إنها حالةٌ **للجاذبية الصغرىٰ micro - gravity**، وهو ما يعني أنه لا تزالُ هناكَ قوةُ جاذبيةٍ ضئيلةٍ موجودةً، وعلىٰ سبيلِ المثال، فإنَّ لجدرانِ المركبةِ قوةَ جاذبيةٍ صغيرةً علىٰ الملاّح، ولكنها ليست صفراً. وإنه ليمكنُنا، بالفعل، أن نُظهِرَ بأنَّ قوةَ الجاذبيةِ لا يمكنُ التخلصُ منها كليةً تحت أيةِ ظروف. قارِنْ التضادَّ بين سلوكِ الجاذبيةِ هذا وبين سلوكِ الكهربائيةِ أو المغناطيسية، إذْ يمكنُ للمرءِ أن يصنعَ حجرةً لا يُحَسُّ فيها بأيةِ قوةٍ كهربائيةٍ أو مغناطيسية، حيثُ تقوم جدرانُ هذه الحجرةِ مقامَ حواجزَ تمنع أية قوىً خارجية مِن أن تنفذَ إلىٰ داخلها، ولكنَّ مِثْلَ هذهِ الدروعِ الحاجزةِ غيرُ ممكنٍ وجودُها بالنسبةِ إلى الجاذبية، فالجاذبيةُ تتخلّلُ كلَّ شيءٍ، وهي مظهرٌ ثابتٌ مِن مظاهرِ المكانِ والزمان.

ولقد أكّدْتُ علىٰ أهميةِ هذا المظهرِ مِن مظاهِرِ الجاذبيةِ، لأنه كان المفتاحَ الأساسيَّ الذي جعلَ آينشتاين يقومُ بخطوتهِ الجريئةِ في مطابقتها بهندسةِ الزّمْكان.

وكما بيَّنّا، فإنَّ الجاذبيةَ تمثّلُ مظهراً ثابتاً للزَّمْكان، ولكنْ كذلك هي الهندسةُ geometry، والتي تصِفُ كيفيةَ قياسِ الأطوالِ والفتراتِ الزمنيةِ والزوايا، في المكانِ



الشكل ٥,١٤: ملاَّحٌ يطوفُ طليقاً في مركبة الفضاء Space Shuttle (صورةٌ عن NASA).

والزمان، كما تصِفُ أيَّ النظرياتِ تنطبقُ على الأشكالِ المختلفةِ المرسومةِ في الزَّمْكان. وحتىٰ نحصلَ علىٰ بنْيَةٍ كميةٍ لتحديدِنا هذا، فإننا نَتَّبِعُ الآتي.

الهندسةُ اللاإقليدية Non - Euclidean geometries

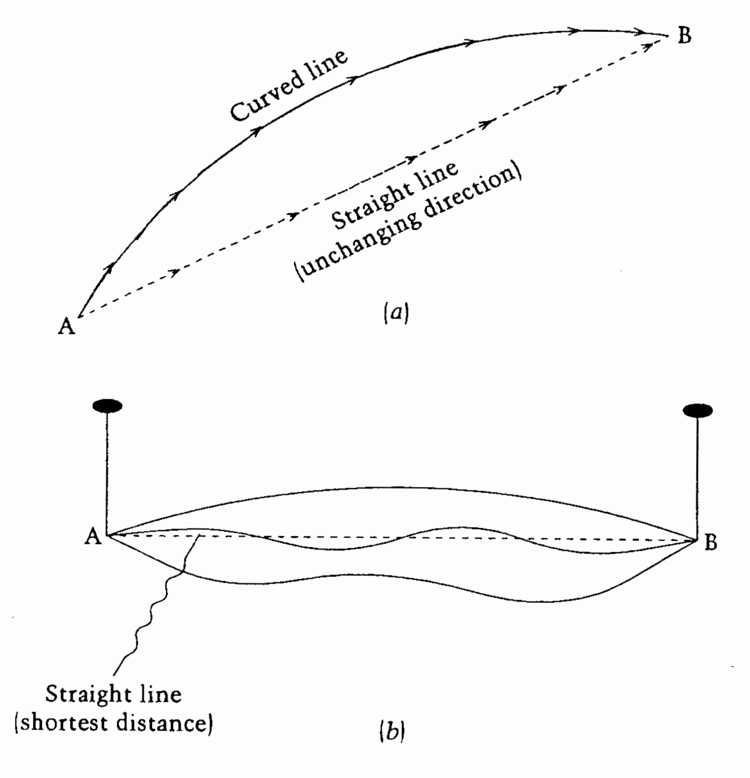
يصِفُ قاموسُ أوكسفورد الهندسةَ بأنها «علمُ خصائصِ وعلاقاتِ الأبعادِ في المكان». ويعودُ أولُ وصفٍ هندسيٍّ منهجيٍّ إلىٰ إقليدس Euclid، حوالىٰ ٣٠٠ ق.م. ولا تزالُ الهندسةُ الإقليديةُ تُدَرَّسُ حتىٰ اليوم، وهي الهندسةُ التي لا تزالُ الأكثرَ استخداماً في حياتِنا اليومية، وكما في المباني، والجسور، والأنفاق، إلخ.

وكأيِّ فرعٍ آخرَ في الرياضياتِ، فإنَّ الهندسةَ الإقليديةَ تبدأُ بعددٍ صغيرٍ من البديهيات axioms أو الفرضياتِ postulates. وهناك مقولاتٌ statements يُنظَرُ إليها علىٰ أنها مُسَلَّمٌ بصحتها، ويعتمدُ الموضوعُ كلُّه عليها، مثلَما تعتمدُ العمارةُ علىٰ أساسِها. وإذا ما تغيّرتِ الفرضياتُ، فإنَّ الموضوعَ المبنيَّ عليها يتغيّرُ أيضاً.

ولقد احتاجَ الرياضيونَ إلىٰ قرونٍ عديدةٍ حتىٰ يدركوا أنَّ فرضياتِ إقليدسَ ليست مقدّسةً إلىٰ أبعدِ حدّ، فهي يمكنُ تغييرُها، كما ويمكنُ صياغة هندساتٍ غيرِ إقليديةٍ مُتَّسِقَةٍ مع نفسها logically self - consistant. ولقد أدّتْ بحوثُ لوباجنسكي (١٧٩٣ـ١٨٥٦)، وبولياي (١٨٠٢ـ١٨٦٠)، وغوس (١٧٧٧ـ١٨٥٥)، وريمان (١٨٢٦ـ١٨٦٦)، إلىٰ هندساتٍ غيرِ إقليديةٍ عديدةٍ، ويمكن أن نعرفَ مدىٰ اختلافِها عن الهندسةِ الإقليديةِ مِن الأمثلةِ القليلةِ التالية.

فلنُنعِم النظرَ، أولاً، فيما يعنيهِ قولُنا «خطٌّ مستقيم». إنَّ الشكلَ ٥,١٥ (أ) يُرينا خطّاً (مرسوماً علىٰ مستوىً)، والخطُّ غيرُ مستقيم. وإذا ما رسمْنا خطّاً مُماسّاً في كلِّ نقطةٍ مِن المنحنىٰ، فإنَّ اتجاهَ المماسِّ يتغيّرُ مع حركةِ النقطةِ علىٰ طولِ المنحنىٰ. أمّا في حالةِ الخطِّ **المستقيم**، فإنَّ هذا الاتجاهَ لا يتغيّرُ. ونرىٰ في الشكل ٥,١٥ (ب) طريقةً أخرىٰ لتحديدِ استقامةِ المنحنىٰ. ومِن بينِ الخطوطِ التي تُوصلُ ما بين النقطتيْنِ A و B، فإنَّ الخطَّ المتقطِّعَ هو وحدَهُ المستقيم، حيثُ إنه الخطُّ الأقصرُ طولاً بين A و B. وإذا ما قُمنا بشَدِّ شريطٍ مطّاطيٍّ بين النقطتينِ A و B، فإنه سوف يتخذُ الطولَ الأقصرَ وسيقعُ علىٰ الخطِّ المتقطع.

وبالنسبة إلينا، نحن الذين تعوّدْنا علىٰ رسمِ الخطوطِ علىٰ الورقِ المستوي، فإنَّ خصائصَ الخطوطِ المستقيمةِ هذهِ مقبولةٌ بالبداهةَ. كما يمكنُنا أن نتقبّلَ فرضيةَ التوازي



الشكل ٥,١٥: يمكنُ تعيينُ الخطِّ المستقيم بإحدىٰ طريقتيْن، (أ) باعتباره الخطَّ الذي يبقىٰ اتجاهُهُ واحداً عندما يتحركُ الشخصُ علىٰ طوله، و(ب) باعتباره الخطَّ الأقصرَ بين نقطتيْن.

لإقليدسَ، والتي تنبئُنا بأنه لو كان لدينا الخطُّ المستقيمُ L، والنقطةُ P خارجَهُ، فإنَّه يمكنُنا أن نرسمَ، عَبْرَ النقطةِ P، خطّاً مستقيماً واحداً فقط، مُوازياً للخطِّ L. ولقد بَدَتْ هذهِ الفرضيةُ، بالفعل، معقولةً جداً، حيثُ حاول علماءُ رياضيونَ عديدونَ إثباتها باعتبارها نظريةً مِن بقيةِ فرضياتِ إقليدسَ، ولكنْ مِن دونِ جدوىٰ.

ولقد اتضحَ للعقل، في نهايةِ المطاف، أنها فرضيةٌ يتوجبُ إضافتُها، حتىٰ نحصلَ علىٰ نظرياتِ هندسةِ إقليدسَ الاعتيادية. ثم إنه ليس مِن الضروريِّ الاحتفاظُ بهذه الفرْضيةِ مِن أجلِ هندسةٍ مُتَّسِقَةٍ مع ذاتِها. وكمثالٍ علىٰ ذلك، يمكنُنا أن نكَوِّنَ عِلماً للهندسةِ علىٰ أساسِ افتراضِ أنه **لا** يمكنُ رسمُ خطٍّ يمرُّ بالنقطةِ P ويوازي الخطَّ L. كما يمكنُنا أن نفعلَ ذلكَ بطريقةٍ أخرىٰ معاكسةٍ، إذ يمكنُنا أن نفترضَ **بأنَّ مِن الممكنِ رسمَ أكثرَ مِن خطٍّ واحدٍ** عَبْرَ النقطة P، موازياً للخطِّ L. وتصيرُ هذه البدائلُ مقبولةً إذا ما

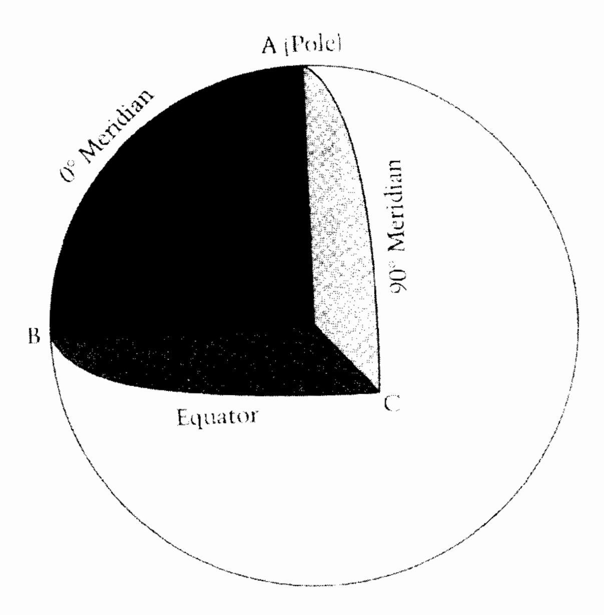
طرَحنا فكرتَنا البديهيةَ في **الفضاءِ المسَطَّحِ flat space** باعتباره مكاناً مِن بُعديْنِ اثنينِ علىٰ الورقةِ المسطحةِ والذي وصفناهُ سابقاً.

وتَخَيَّلْ، بدلاً مِن ذلك، سطحاً منحنياً لكرةٍ ذي بُعديْنِ اثنين. ماذا سوف تكونُ عليه الهندسةُ إذا ما كانت الخطوطُ محصورةً بسطحِ الكرةِ؟ إنَّ الشكلَ ٥,١٦ يُظهِرُ لنا بأنَّ في إمكاننا أن نرسمَ «خطاً مستقيماً» بين أيَّتَيْ نقطتيْنِ، A و B، علىٰ الكرةِ، بِشَدِّ الشريطِ المطاطيِّ بينهما. وهذا الخطُّ هو في الحقيقةِ قوسُ الدائرةِ العظيمةِ الذي يمرُّ عَبْرَ A و B (الدائرةُ العظيمةُ هي تلك الدائرةُ التي يرسمُها علىٰ سطحِ الكرةِ مستوىً يمرُّ عبر مركزِ الكرة).

وهكذا فإنَّ أيَّ دائرتيْنِ عظيمتيْنِ سوف تتقاطعان، ولذا فإنَّ كلَّ الخطوطِ «المستقيمةِ» التي تقعُ علىٰ السطحِ الكرويِّ سوف تتقاطعُ. وتَصِلُ بنا هذهِ النتيجةُ إلىٰ تناقضٍ مع الفكرةِ الشائعةِ للخطوطِ المتوازية. ويُعتبَرُ الخطّانِ المستقيمانِ علىٰ السطحِ المستوي متوازييْنِ إذا لم يتقاطعا أبداً، حتىٰ لو تمَّ مدُّهُما بأيٍّ مِن الاتجاهيْنِ وإلىٰ ما لا نهايةَ له. ومِن الواضحِ أنَّ ذلك لا ينطبقُ علىٰ سطحِ الكرةِ. وبعبارةٍ أخرىٰ فإنه لا يوجدُ هناك خطّانِ متوازيانِ، ونحن نملكُ هنا مثالاً علىٰ النوعِ الأولِ من انتهاكِ فرضيةِ المتوازياتِ لإقليدس. إنَّ براهينَ إقليدسَ التي تَستخدِمُ الخطوطَ المتوازيةَ تتهاوىٰ في هندسةِ السطحِ الكرويّ. فعلىٰ سبيلِ المثال، لن يبلغَ مجموعُ زوايا المثلثِ الثلاث ١٨٠ درجةً كما هو الحالُ مع هندسةِ إقليدسَ، بل إنَّ مجموعَها سوف يكونُ أكبرَ مِن ١٨٠ درجةً. وتبلغُ زوايا المثلثِ الذي نراهُ في الشكلِ ٥,١٦ : $\hat{A}+\hat{B}+\hat{C}=$ ٢٧٠ درجةً.

وتُعْرَفُ السطوحُ المنحنيةُ مِن هذا النوعِ بسطوحِ **الانحناءِ الموجَب positive curvature**. ولو كنّا اخترنا، بدلاً مِن ذلك، أن نَعدِّلَ مِن فرضيةِ المتوازياتِ في الطريقةِ الثانيةِ مِن الطريقتيْنِ اللتيْنِ وصفناهُما قبلاً، لتوصّلْنا إلىٰ هندسةٍ تنطبقُ علىٰ سطوحِ **المنحنىٰ السالب negative curvature**. إنَّ سَرْجاً، أو سطحاً لبرميلٍ قريبٍ مِن فوهتِه، هما مثالانِ علىٰ سُطوحٍ للمنحنىٰ السالب. ففي المثلثِ ABC علىٰ سطحٍ كهذا، فإنَّ مجموع $\hat{A}+\hat{B}+\hat{C}$ أقلُّ مِن ١٨٠ درجةً.

وهناك تجربةٌ بسيطةٌ لتقريرِ إن كان لسطحٍ ما منحنىً صفريٌّ، أو موجبٌ أو سالب. خُذْ قطعةً من الورقِ وحاولْ أن تغطّيَ بها أجزاءً مِن السطحِ، فإذا وَقَعَتِ الورقة مُلامِسَةً للسطحِ تماماً كقطعةِ المَخْمَلِ، فإنَّ مُنحَناها يبلغُ صِفراً، أي أنها مسطحةٌ أو مستوية. وأما إذا حَدَثَتْ طيّاتٌ وتجاعيدُ للورقةِ في أثناءِ مُحاولةِ تغطيةِ السطحِ بالضبطِ، فإنَّ للسطحِ



الشكل ٥,١٦ : يبلغ مجموعُ زوايا المثلثِ ABC، علىٰ سطح الكرةِ، أكثرَ مِن زاويتيْنِ قائمتيْنِ. وبالنسبةِ إلىٰ هذا المثلثِ الكرويِّ بالذاتِ، فإنَّ كلاً مِن زواياهُ الثلاث هي زاويةٌ قائمة. لاحِظْ أنّ الخطوطَ «المستقيمةَ» يمكنُ رسمُها بِشَدِّ شرائطَ مطاطيّةٍ بين A و B و C.

منحنىً موجباً. والاحتمالُ الثالثُ هو **تمزّقُ** الورقةِ في أثناءِ عمليةِ التغطيةِ، وهو ما يعني أنّ للسطحِ منحنىً سالباً. حاوِلْ أن تُجرِيَ هذه التجربةَ علىٰ السطحِ العلويِّ لمنضدةٍ، وكرةٍ، وسرجٍ.

وما علاقةُ ذلك كلِّه بالجاذبية؟ إنّ أفكارَ **المكانِ** المسطَّحِ والمنحني يمكنُ أن نوسِّعَها إلىٰ أمكنةٍ ذاتِ أبعادٍ أكبر. وعلىٰ سبيلِ المثال، فإنَّ هندسةَ أبعادِ المكانِ الثلاثةِ والبُعْدِ الواحدِ للزمنِ، والتي تنطبقُ عليها نظريةُ آينشتاين للنسبيةِ الخاصّة، هي هندسةُ **المكانِ المسطح flat space**. وبسببِ الجاذبيةِ الموجودةِ **أبداً**، فإنَّ هندسةَ الزَّمْكانِ المسطحِ هذه، وحسبَ آينشتاين، تصيرُ شيئاً مثالياً. إنّ هندسةَ **المكانِ** والزمانِ يتوجبُ أن تكونَ في واقعِ الحالِ مِن النوعِ المنحني غير التقليديّ. **وغالباً ما تتمُّ** الإشارةُ إلىٰ استنتاج آينشتاين المهمِ هذا بالقولِ: «إنَّ الزَّمْكانَ مُنْحَنٍ spacetime is curved».

تأثيرُ المادةِ في هندسةِ الزَّمْكان

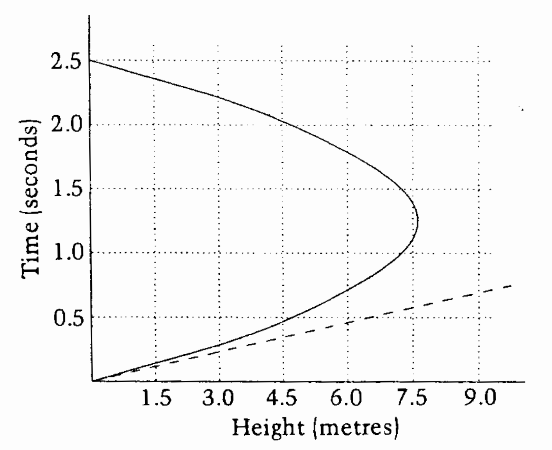
يمكنُنا أن نَخرُجَ الآنَ، مِن الأمثلةِ السابقةِ علىٰ هندسةِ المكانِ، بتعميم علىٰ هندسةِ الزَّمْكان. ويمكنُ أن نقومَ بذلكَ علىٰ أحسنِ وجهٍ بمساعدةِ حَدَثٍ مُعتادٍ، وهو الكرةُ التي

تُقذَفُ عمودياً إلىٰ الأعلىٰ. والشكلُ ٥,١٧ هو مخطَّطٌ للزَّمْكان يُرينا خطَّ وجودِ worldline الكرةِ. ونقومُ هنا بوضعِ **الارتفاع عن سطحِ** الأرضِ علىٰ المحورِ الأفقيِّ، ونضعُ الزمنَ المنقضي منذُ قذفِ الكرةِ إلىٰ **الأعلىٰ** علىٰ المحورِ العموديّ.

وبالاختصارِ فإنَّ ما يحدثُ هو التالي: لقد قُذِفَت الكرةُ إلىٰ الأعلىٰ بسرعةٍ محددةٍ، ولنَقُلْ إنها ١٢ متراً في الثانية. ولكنَّ الكرةَ تفقدُ مِن سرعتها مع صعودِها إلىٰ الأعلىٰ، ثم هي تتوقفُ لهنيهةٍ علىٰ ارتفاعِ ٧,٥ المتر، ثم تبدأُ بالسقوط. وبينما هي تسقطُ أكثرَ وأكثر، فإنَّ سرعتَها نحو الأسفلِ تزدادُ، ثم هي تصلُ إلىٰ ١٢ متراً في الثانيةِ الواحدة عند المستوىٰ الذي قُذِفَتْ منه ذاتِه أولَ الأمر. ويظهرُ في الشكل خطُّ الوجودِ علىٰ شكلٍ يُعرَفُ عند الرياضيينَ **بالقَطْعِ المُكافئ Parabola**. ويبدأُ المنحنىٰ بانحدارٍ يعتمدُ علىٰ السرعةِ الابتدائيةِ للرميةِ، ثم يزدادُ انحدارُه تدريجياً مع انخفاضِ السرعة. وفي أوجِ الارتفاعِ الذي تَصِلُهُ الكرةُ، فإنَّ الانحدارَ يصيرُ عمودياً لبرهةٍ، ثم يبتدئُ بالحركةِ نحوَ محورِ الزمن (متوافِقاً مع حركةِ الكرةِ إلىٰ الأسفل).

كيف نفهمُ هذه الحركةَ حَسَبَ قوانينِ الحركةِ والجاذبيةِ لنيوتن؟ إن الكرةَ تسلُكُ هذا السلوكَ لأنَّ جاذبيةَ الأرضِ تجذبُ الكرةَ إلىٰ الأسفلِ، فتؤدي إلىٰ الإبطاءِ مِن سرعتها، وبالحقيقةِ، فلولا وجودُ مِثْلِ قوةِ الجاذبيةِ هذه لاستمرّت الكرةُ في مَسيرِها بالسرعةِ ذاتها إلىٰ الأعلىٰ (إنَّ قانونَ نيوتن الأولَ للحركة ينبئُنا بأنَّ الجسمَ يحافظُ علىٰ سرعتِه واتجاهه في حالةِ عدمِ وجودِ أيةِ قوةٍ خارجية). إنَّ الخطَّ المستقيمَ المتقطّعَ يُرينا هذا السلوكَ الافتراضيّ.

وهذا الخطُّ المتقطعُ هو مثالٌ علىٰ خطٍّ مستقيمٍ في زَمْكانٍ مِن أربعةِ أبعاد. ومعنىٰ



الشكل ٥,١٧: خطوطُ وجودِ كرةٍ تُقذَفُ إلىٰ الأعلىٰ بصورةٍ عموديةٍ في واقع الحال (الخط المنحني المستمر) وفي حالةِ عدم وجود الجاذبية (الخط المستقيم المتقطع).

ذلك أننا إذا كان لدينا الزَّمْكانُ الذي وصفناهُ للنسبيةِ الخاصة (انظرْ الشكل ٥,٩)، فلسوف يكونُ هذا الخطُّ مؤهلاً لأنْ ندعوهُ بـ «المستقيم».

وكما أوضحنا في الحالةِ أعلاه، يمكنُنا أن نتعرّفَ، في سطحٍ مُنْحَنٍ كسطحِ الكرةِ، علىٰ «خطوطٍ مستقيمةٍ» في زمكانٍ منحنٍ، بتوسيع طريقةِ شدِّ الشريطِ المطاطيِّ بين نقطتيْن. ولكنَّ هذه التقنيةَ رياضيةٌ بأكثر مِن أن يمكنَ وصفُها هنا.

ولننظرْ إلىٰ الخطّيْنِ الاثنينِ في الشكل ٥,١٧، مِن وجهةِ نظرِ آينشتاينية. لسوف يحاولُ آينشتاينُ أن يبرهنَ علىٰ السؤالِ الافتراضيِّ لكيفيةِ حركةِ الكرةِ في حالةٍ «لا توجدُ فيها الجاذبيةُ»، وليس لها تأثيرٌ في الحالةِ الواقعية. ذلك لأنَّ مِثْلَ هذه الحالةِ لا يمكنُ أن توجَدَ ـ فالجاذبيةُ غيرُ قابلةٍ للاتلاف. إنَّ خطَّ الوجودِ worldline الوحيدَ الذي يمكنُ أن يكون حقيقياً هو المنحنىٰ، وهو الذي يتوجبُ علينا أن نفهمَه ونفسّرَهُ مِن أيسرِ سبيل.

وهكذا فلسوف يكونُ مِن رأيِ آينشتاينَ أن **المنحنىٰ غيرَ المتقطع**، في الشكل ٥,١٧، هو الخطُّ المستقيمُ الحقيقيُّ، وهو يمثّلُ حركةً منتظمةً مِن دونِ أيّةِ قِوىٰ. ونقولُ «مِن دونِ قِوىٰ»، لأنَّ الجاذبيةَ باعتبارها قوةً قد حلَّ محلَّها زمانٌ لاإقليديّ.

ولكنَّ مِثْلَ هذا القولِ يَبدو، وبجلاءٍ، مغلوطاً، فالخطُّ مُنْحَنٍ بالتأكيد، ولا يمكنُ أن نسمّيهِ بالخطِّ المستقيم. ثم إنَّ سرعةَ الكرةِ علىٰ طولِه ليست هي ذاتَها في كلِّ مكانٍ منه.

وعلىٰ أيةِ حالٍ، فكَوْنُ أيِّ الخطوطِ مستقيماً وأيُّها ليس كذلك يعتمدُ علىٰ قواعدِ الهندسةِ المعنية. ولقد استخدمْنا ضمناً الهندسةَ الإقليديةَ، في الشكل ٥,١٧، لحسمِ الأمر. **ولسوف يجادلُ آينشتاينُ بأنَّ الهندسةَ ليست إقليديةً، لأنَّ جاذبيةَ الأرضِ تجعلُ هندسةَ الزمكانِ لاإقليديةً**. ومع تغيّرِ القواعدِ الهندسيةِ، فإنَّ ذلك هو السببُ في أنَّ الخطَّ المستمرَّ في الشكل ٥,١٧ يستحقُّ وصفَ «المستقيم». وتنطبقُ الملاحظةُ ذاتُها علىٰ تغيُّرِ السرعة الظاهريّ. ولو طبّقْنا قواعدَ الهندسةِ اللاإقليديةِ علىٰ المسارِ المستمرِّ فلسوف نكتشفُ بأنّ سرعتَه، مترجمةً بالأبعادِ الأربعةِ، ثابتةٌ في درجتها واتجاهها.

وقد يُفيدُنا هنا أن نُمثّلَ لذلكَ بالخرائطِ التي نجدُها في الأطالس. إنَّ هذه الخرائطَ غالباً ما تُرينا خطوطَ العَرْضِ باعتبارها خطوطاً مستقيمةً. ولكنَّ هذه الخطوطَ، علىٰ سطحِ الأرضِ المنحني، **ليست** مستقيمة. ويمكنُ التحققُ، وبِيُسْرٍ، مِن أنها ليست الخطوطَ الأقصرَ للمسافةِ بين نقطتيْنِ علىٰ سطحِ الأرضِ، في خطِّ العَرْضِ ذاكَ، مِن خلالِ شَدِّ شريطٍ مطاطيٍّ بين تينك النقطتيْن.

وهكذا فلقد كانت خُطّةُ آينشتاينَ الأساسيةُ نحو نظريةٍ للجاذبيةِ كالآتي: إنَّ أيَّ تَوَزُّعٍ للمادةِ والطاقةِ في الفضاءِ يجعلُ مِن هندسةِ الزَّمْكانِ، بالضرورة، هندسةً لاإقليدية. ومعَ هندسةٍ كهذه، فإنَّ خطوطَ وجودِ الأجسامِ المتحركةِ فيها إنما هي خطوطٌ مستقيمة، أي المسارات المنحنية المحسوبة بافتراضِ حركةِ الجسمِ في الزَّمْكانِ بسرعةٍ منتظمةٍ وباتجاهٍ لا يتغير. وتُعرَفُ مِثلُ هذهِ الخطوطِ المستقيمة باسْمٍ تقنيٍّ هو «الخطوطُ الجيوديسيةُ» geodesic lines[(١)].

ولسوف يبرهنُ آينشتاينُ، بهذه الطريقةِ، علىٰ أنّ جسماً لا تعملُ عليهِ قوةٌ أخرىٰ غيرُ الجاذبيةِ، سوف يتحركُ علىٰ طولِ خطٍّ جيوديسيٍّ **محسوبٍ حسبَ قواعدِ الهندسةِ السائدة**. ولقد أعطىٰ آينشتاينُ مجموعةً مِن المعادلاتِ لتحديدِ الهندسةِ السائدةِ، إذا كانت المعلوماتُ حول توزيعِ المادةِ والطاقةِ في المنطقةِ معروفةً.

وهذا هو جوهرُ كلِّ ما تعنيه نظريةُ النسبيةِ العامة.

تطبيقاتٌ علىٰ المنظومةِ الشمسية

تمَّ تطبيقُ النظريةِ العامةِ للنسبيةِ، أوّلَ مرةٍ، عامَ ١٩١٦، علىٰ مسألةِ حركةِ الكواكبِ السيارةِ في المنظومةِ الشمسية. وكانت طريقةُ حلِّ المسألةِ التي استخدمَها كارل شوارزجايلد (الشكل ٥,١٨) كالذي أشَرْنا إليه أعلاه. افترِضْ أنّ الفضاءَ يحتوي علىٰ كرةٍ لِلَّعِبِ كرويةٍ، وبكتلةٍ ككتلةِ الشمس، ثم احسبْ، بمساعدةِ معادلاتِ آينشتاينَ، ما الذي سوف تكونُ عليه هندسةُ الزَّمْكانِ حولَها.

ولحسنِ الحظِّ، فإنَّ حلَّ هذه المسألةِ هو أمرٌ ممكنٌ تماماً، رغمَ طبيعةِ معادلاتِ آينشتاينَ المعقّدةِ. ويُعتبرُ حلُّ شوارزجايلد أساسياً جداً للنسبية، وقد تمَّ استخدامُه في مجالاتٍ عديدةٍ، ومنها المنظومةُ الشمسية. وتختلفُ الهندسةُ هنا، بالطبعِ، عن هندسةِ إقليدسَ تماماً، ولهذا فإنَّ الجيوديسياتِ في هذه الهندسةِ ليست هي الخطوطَ المستقيمة الإقليديةَ ذاتَها.

وباستخدام مَبدإِ مِثالِ رَمْيِ الكرةِ، يمكنُنا أن نحسبَ هذه الجيوديسات في هندسةِ شوارزجايلد، لمعرفةِ كيفيةِ حركةِ الكواكبِ السيارةِ حول الشمس. وذلك لأنَّ خطوطَ وجودِ الكواكبِ السيارةِ في جيوديساتُ هندسةِ شوارزجايلد. ونجدُ في الشكل ٥,١٩

---

(١) الخطُّ الجيوديسيُّ هو أقصرُ خطٍّ بين نقطتَينِ علىٰ سطحٍ مُعَيَّن. د.س

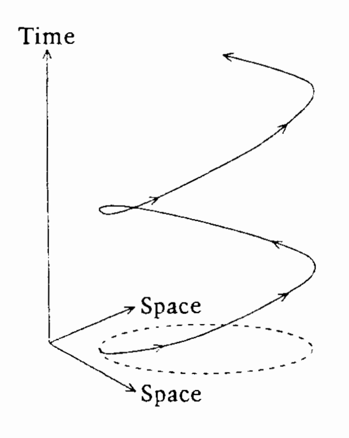


الشكل ٥,١٨ : كارل شوارزجايلد.

وصفاً لخطِّ وجودٍ نموذجيّ. ولو قمنا بإسقاطِه على الجزءِ الفضائيِّ مِن مُخطَّطِ الزَّمْكانِ، فسنحصلُ على مدارٍ للكوكبِ السيّار. **وهذا المدارُ ذاتُه، عملياً، هو ما سنحصلُ عليه تقريباً فيما لو استخدمْنا قوانينَ نيوتن للحركةِ والجاذبية.**

ونقولُ: تقريباً، وليس تماماً! ذلك لأنّ هناك فروقاً صغيرةً لا يُحَسُّ بها بالمشاهدةِ، باستثناءِ الكوكبِ عُطارِد. ولقد أشرْنا إلى هذا التأثيرِ الصغيرِ في الفصلِ السابق (انظرْ الشكل ٤,١٨). إنَّ مدارَ عُطاردَ يَسْبِقُ precesses ببطءٍ، بحيثُ إنَّ الخطَّ المتّجهَ مِن الشمسِ إلى أقربِ نقطةٍ في المدارِ (وتسمى بالحضيضِ الشمسيِّ perihelion) يدورُ في الفضاءِ بزاويةٍ صغيرةٍ تبلغُ ٤٣ ثانيةً قوسيّةً في في كلِّ قرنٍ مِن الزمان. وكما ذكرْنا هناك، فإنَّ هذا التأثيرَ النسبيَّ العامَّ قد كشفَ اللِّثامَ عن اللُّغْزِ القديمِ الذي أحاطَ بسلوكِ عُطاردَ الغريبِ، والذي لوحظَ منذ أواسطِ القرنِ التاسع عشر.

وهناك، أيضاً، تجاربُ أخرى على المنظومةِ الشمسية، ومِن هذه التجاربِ تلك التي تتضمّنُ حَنْياً للضوءِ، وهي تجربةٌ لها نتائجُ عديدة. ولقد كانت هذه التجربةُ، والطريقةُ المثيرةُ التي أُعلِنَتْ بها نتائِجُها، هي ما رَسَّخَ في أذهانِ الناسِ النظريةَ العامةَ للنسبيةِ



الشكل ٥,١٩ : خَطُّ وجودٍ لكوكبٍ سيارٍ يلفُّ لولبياً، بحيثُ يَصِفُ مَسْقطُهُ في الفضاءِ المدارَ البيضويَّ للكوكبِ السيار.

باعتبارها نظريةً غايةً في الثوريّة. ولسوف نجِدُ المزيدَ عن هذه القِصّةِ في الفصلِ القادمِ.

وهناك تجربةٌ أحدثُ عهداً، وقد أشرْنا إليها في الفصلِ السابقِ أيضاً. ولقد صارت هذه التجربةُ ممكنةً باستخدامِ التقنياتِ الفضائيةِ، وهي مبنيّةٌ علىٰ التأخيرِ الحاصلِ في صدىٰ الإشارةِ الراديوية عند مرورها قريباً مِن سطح الشمس.

وتهدفُ هذه التجاربُ كلُّها إلىٰ إظهارِ أنَّ الهندسةَ الإقليديةَ البسيطةَ، والتي ننظرُ إليها علىٰ أنها أمرٌ مُسَلَّمٌ به، علىٰ أساسِ استخدامِها علىٰ سطحِ الأرضِ، قد لا تصِفُ الواقعَ تماماً. وكذلك فإنَّ قوانينَ نيوتنَ للحركةِ والجاذبيةِ، والتي خدمَتْنا كثيراً، قد لا تكونُ صحيحةً كليّةً. ولو قارَنّا الكونَ الفعليَّ مع توقعاتِ نيوتنَ وآينشتاينَ فإننا نصلُ إلىٰ نتيجةٍ مفادُها أنّ الأخيرَ هو الأقربُ إلىٰ الواقع. وهكذا يتوجبُ علينا أن نتّبِعَ، في دراستِنا لظاهرةِ الجاذبيةِ، طريقةَ التفكيرِ الآينشتاينيةَ.

وهناك طريقةٌ رمزيةٌ للتعبيرِ عن هذا الاستنتاجِ، وهي تتمثلُ في قولنا بأننا نعيشُ في زَمْكانٍ مُنْحَنٍ curved spacetime. ولِأنَّ تأثيراتِ الجاذبيةِ علىٰ هندسةِ الزَّمْكانِ بالقربِ مِنّا صغيرةٌ جداً نسبياً، فإنه لَيُمكنُنا أن نتدبَّرَ الأمرَ تماماً، باستخدامِ قوانينِ نيوتن والهندسةَ الإقليدية. ولكنَّ هناك مواقعَ أخرىٰ، في الكونِ، تأثيراتُ الجاذبيةِ فيها قويةٌ جداً، وهو ما يؤدي إلىٰ أن يكون سلوكُ الزَّمْكانِ غريباً جداً، عند النظرِ إليه بالمقاييسِ الإقليدية. وسنصِفُ الآنَ أمثلةً بارزةً علىٰ ذلك.

الانهيارُ الجاذبيّ Gravitational collapse

نحن نعلمُ، بالبديهةِ، بأنَّ تأثيرَ الجاذبيةِ كبيرٌ حيثما كان هناك وجودٌ لتركيزٍ كبيرٍ مِن المادةِ والطاقة، فكيف نتوصلُ إلىٰ مِثلِ هذه التركيزاتِ الكبيرة؟ وقبلَ أن نجيبَ علىٰ هذا

السؤالِ، فلنتفحّصْ وسيلةً تُنبئُنا إنْ كانت قوةُ الجذبِ في المنطقةِ قويةً أو ضعيفة، وتتمثلُ هذه في فكرةِ سرعةِ الإفلاتِ، أو الهروب.

سرعةُ الإفلات Escape speed

لِنَعُدِ الآنَ إلىٰ مثالِ الكرةِ التي تُقذَفُ إلىٰ الأعلىٰ. لقد لاحظْنَا أنها إذا ما قُذِفَتْ بسرعةٍ ابتدائيةٍ تبلغُ ١٢ متراً في الثانية، فإنها ستصعد إلىٰ ارتفاع ٧,٥ المتر. ولو قذفْناها بسرعةٍ ابتدائيةٍ مضاعفةٍ، فكم سيكونُ ارتفاعُها؟ إنَّ الحساباتِ تنبئُنا بأنها سوف ترتفعُ أربعةَ أضعافِ ارتفاعها الأول.

ويأخذُ هذا التعريفُ بنظرِ الاعتبارِ القوةَ التي تجذبُ الأرضُ بها جسماً ما، حسبَ قوانينِ نيوتنَ للجاذبية. ورغمَ أننا برهنّا علىٰ أنَّ النسبيةَ العامةَ هي النظريةُ الأفضلُ، فإنَّ الأجوبةَ التي تُعطينا إياها قوانينُ نيوتنَ ليست جيدةً بما يكفي لهذه المناقشة.

ويمكنُنا أن ندفعَ بمناقشتِنا إلىٰ ما هو أكثرُ مِن ذلك. هل يمكنُ لنا أن نقذفَ الكرةَ بدرجةٍ مِن القوةِ لا تعودُ معها إلىٰ الأرضِ أبداً؟ يبدو الجوابُ سلبياً، لأولِ وهلة. إذ قد يبدو مِن خلالِ الاستقراءِ الاستنتاجيِّ البسيط للبرهانِ السابقِ أنه مهما بلَغَتْ قوةُ قذفِنا للكرةِ فإنها سوف تعودُ إلىٰ الأرض، ولكنَّ هذه فكرةٌ خادعة، إذ إنَّ قوةَ الجاذبيةِ سوف تفقدُ شدّتها بارتفاعِ الكرةِ عن الأرض. وعلىٰ ارتفاع يساوي نصفَ قطرِ الأرضِ، وهو يبلغُ ٦٤٠٠ كيلومترَ تقريباً، فإنّ تلك القوةَ تنخفضُ إلىٰ ربعِ قيمتها التي هي عليها علىٰ سطحِ الأرض. وتستمرُ قوةُ الجاذبيةِ في انخفاضها كلما زادَ ارتفاعُها عن سطحِ الأرض. وهكذا فإنَّ مِن الممكنِ أن نقذفَ كرةً بسرعةٍ محدَّدةٍ، بحيثُ إنها تستمرُ في المسيرِ أبعدَ وأبعدَ، ثم لا تعودُ أبداً. وتبلغُ هذه القوةُ التي أُسمِيَتْ بِحقٍّ **قوةَ الإفلات**، حوالىٰ ١١,٢ الكيلومتر في الثانية، أي ٤٠٠٠٠ كيلومترٍ في الساعةِ تقريباً.

وحَدُّ السرعةِ الدنيا هذا هو أكبرُ مِن سرعةِ أسرعِ طائرةٍ نفاثةٍ نملكُها، ولكنها ليست أبعدَ مِن قدرةِ صواريخنا القوية. وبفضلِ التقنيةِ الفضائيةِ فلقد صارَ في إمكانِنا أن نفلتَ مِن الكرةِ الأرضية، لا بل صارَ مِن الممكنِ إرسالُ سفنٍ فضائيةٍ مثل «الرَّحّالة ١ و٢» Voyager I and II، والتي خرجَتْ مِن تُخومِ منظومتنا الشمسية.

وهكذا فإنَّ سرعةَ هروبِ جسمٍ ما تُنبئُنا عن مدىٰ قوةِ الجاذبيةِ المحليّةِ في تلك المنطقة. ولننظرْ، مِن الناحية الأخرىٰ، إلىٰ القمر. إنَّ سرعةَ الإفلاتِ مِن سطحِ القمر لا تتعدىٰ ٢,٤ الكيلومتر في الثانية. وهذا هو السببُ في سهولةِ عودةِ الملاّحينَ القمريّينَ

النسبيةِ إلىٰ الأرض، ولقد كان بإمكانهم أن يرتفعوا بمركباتهم الصغيرةِ بوساطةِ صواريخَ مُبيّتةٍ[1] built in، ولم يحتاجوا إلىٰ صواريخَ عظيمةٍ كتلكَ التي نجدُها في كيب كندي.

ومِن الناحيةِ الأخرىٰ، فإنَّ سرعةَ الهروبِ مِن عُطاردَ هي أعلىٰ بكثيرٍ، إذ تبلغ ٦٠,٨ مِن الكيلومتراتِ في الثانية. أمّا سرعةُ الإفلاتِ مِن الشمسِ فهي أكبرُ مِن ذلك بعشرةِ أضعافٍ، وتُعادلُ ٦٤٠ كيلومتراً في الثانية، وهي تبلغُ رقماً هائلاً مِن ١٦٠٠٠٠ كيلومترٍ في الثانيةِ على سطحِ النجمِ النيوترونيّ! وهذا مؤشّرٌ علىٰ بيئةِ الجاذبيةِ المعتدلةِ جداً هنا علىٰ سطح الأرض. وأمّا علىٰ المستوىٰ الكونيّ، فإننا قد نُواجِهُ مناطقَ مِن الجاذبيةِ القويةِ لا يمكنُ تخيّلُها لِمَن هو علىٰ سطحِ الأرض[2].

وأمّا وقد صارت لدينا فكرةٌ، إلىٰ حدٍّ ما، عن كيفيةِ تقديرِ قوّةِ الجاذبية، فلننظرْ في كيفيةِ نشوءِ وتَعاظُمِ الجاذبيةِ القويةِ في الأحوالِ الكونية.

نشوءُ وتَعاظُمُ الأجسامِ المنهارةِ (المتقلصةِ) بشِدَّة

إنَّ الجاذبيةَ، وسواءً أنظَرْتَ إليها مِن وجهةِ نظرِ نيوتنَ أو آينشتاين، لَهِيَ نوعٌ مِن التفاعلِ غريب. وعندما سُئِلَ نيوتن إنْ كان قد تعمّقَ في أغوارِ مصدرِ قانونه للجاذبيةِ، لمعرفةِ سببِ خروجهِ بمثلِ هذا القانونِ في الطبيعةِ، فلقد أجاب بقوله: «إنني لا أضعُ نظريةً Non fingo hypothesis». لقد كانت مقاربةُ نيوتن لهذا الموضوعِ تجريبيةً أساساً، مِن خلالِ النظرِ إلىٰ نَمَطٍ ما، ورؤيةِ إنْ كان يتّبِعُ قانوناً عامّاً ولكنْ بسيطاً. وأمّا آينشتاينُ، فلقد ذهبَ إلىٰ ما هو أبعدُ مِن ذلك، مِن خلالِ رؤيته لرابطةٍ ما بين الجاذبيةِ وهندسة الزّمْكان. ولكننا لم نحصلْ، هنا أيضاً، علىٰ أيِّ تقدُّمٍ إضافيٍّ في سبيلِ فهم السببِ الأساسيِ لهذه الرابطة. وبالخصوصِ، فإنَّ فهماً للجاذبيةِ علىٰ المستوىٰ المجهريِّ للمادة، وباستخدامِ قواعدِ نظريةِ الكمِّ، لا يزالُ عَصِيّاً علينا.

إلاَّ أنَّ بإمكاننا أن نستنتجَ ما نحنُ جاهِلوهُ، اعتماداً علىٰ ما قد عرفْناهُ حتىٰ الآنَ. وهذا ما سوف نفعلُه في وصفِنا لجسمٍ عظيمٍ يُصارِعُ مِن دونِ نجاحٍ للحفاظِ علىٰ توازنهِ

---

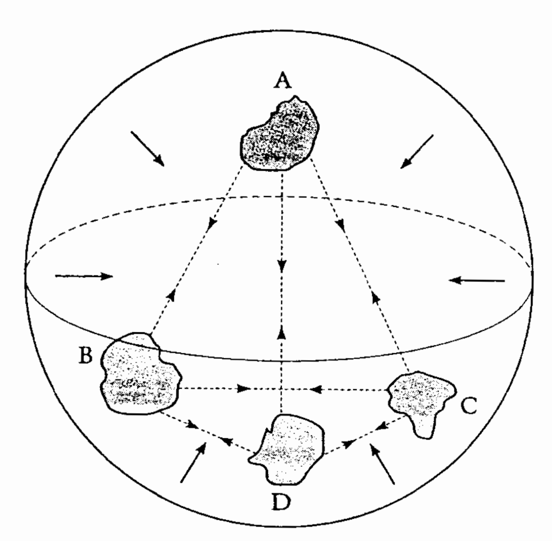
(١) أي مبنيَّة داخلَ الجدار ـ المورد.

(٢) فسُبحان اللّهِ الذي قَدَّرَ الجاذبية علىٰ وجه الأرضِ تقديراً موزوناً بأحسن ما يكونُ، فلا نحنُ بالملتصقينَ بالأرضِ التصاقاً يعيقُ فعالياتِنا جميعاً، ولا نحن وما حولَنا بالذينَ نتطايرُ مِن الخِفَّةِ إلىٰ الفضاءِ فتعْسُرُ حياتُنا أيَّ عُسر.
﴿. . وإن تعدوا نعمة اللّه لا تحصوها إن الإنسان لظلوم كفار﴾ [إبراهيم: ٣٤]. د.س

رغمَ قوةِ الجذبِ التي تجذبُه نحوَ الداخلِ، ذلك لأنّ جسماً كهذا، وكما سوف نكتشفُ سريعاً، سوف يقودُنا إلىٰ حالةٍ مِن الجاذبيةِ القوية.

ويُرينا الشكلُ ٥,٢٠ جسماً كروياً عظيماً كهذا. وترمزُ الحروفُ A، B، C إلخ إلىٰ أجزائِه المكوِّنةِ له، والتي يجذبُ أحدُها الآخرَ. والمحصّلةُ النهائيةُ لذلك هي أن ينهار (ينكمشَ) الجسمُ نفسُه، ما لَمْ تَحُلْ دونَ ذلك قوةٌ خارجيةٌ ما. ولقد رأينا في الفصلِ الثاني أنَّ النجومَ يتوجّبُ عليها أن تُواجهَ هذه المعضلةَ المرّةَ بعدَ المرّةِ، وأنها قادرةٌ علىٰ الاحتفاظِ بتوازناتها مِن خلالِ الضغطِ الداخليِّ، **وبشرطِ أن يتولّدَ هذا مِن خِلالِ التفاعلاتِ النوويةِ في المركز**. وعندما ينفَدُ وَقودُ النجومِ النوويُّ، فقد تبقىٰ لديها فرصةٌ أخرىٰ، مِن خلالِ الضغوطِ الانحلالية degeneracy pressures الناجمةِ عن الانضغاطِ الكبيرِ لمادّتِها. ولسوف تبقىٰ أمثالُ هذهِ النجومِ علىٰ قيْدِ الحياةِ، عندئذٍ، علىٰ شكلِ أقزامٍ بيضاءَ أو نجومٍ نيوترونية. إلاّ أنَّ هناك، وفي كِلتا الحالتيْنِ، حدّاً لكتلتها. فبالنسبةِ إلى النجومِ البيضاءِ، يتوجّبُ أن لا تَزيدَ الكتلةُ علىٰ ٤٠٪ فوقَ كتلةِ الشمسِ، بينما أنَّ الحَدَّ، بالنسبةِ إلى النجمِ النيوترونيِّ، هو أعلىٰ مِن ذلكَ نوعاً ما، ولكنه يلامِسُ بالكادِ كتلتيْنِ شمسيتيْن. ولكنْ، ما الذي يحدثُ لنجمٍ يجِدُ نفسَهُ بكتلةٍ أكبرَ مِن هذه الحدودِ، عندما يستنفدُ وقودَه النوويّ؟

لقد رأيْنا، في الفصلِ الثالث، احتمالَ أن ينفجرَ النجمُ العظيمُ علىٰ شكلِ مستسعرٍ أعظم supernova، تاركاً وراءَه لُبّاً. ويمكنُنا أن نصوغَ سؤالَنا أعلاهُ لِلُّبِّ ذاتِه.



الشكل ٥,٢٠: إنَّ أجزاءَ الجسمِ المختلفةَ A، B، C، . . . يجذبُ بعضُها بعضاً بقوةِ الجاذبيةِ، وهو ما ينتجُ عنه نزوعُ الجسمِ كلِّه إلىٰ الانكماش.

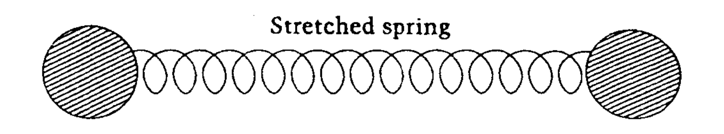
ونحن نستعيدُ هنا ذلك التناقضَ ما بين آينشتاينَ وبين شاندراسيكار، والذي أشَرْنا إليه في الفصلُ الثاني. لقد رَفَضَ أدنغتون القبولَ بنتيجةِ شاندراسيكار بالنسبةِ إلىٰ الكتلةِ القصوىٰ المسموحةِ للقزمِ الأبيض، لأنه خَشِيَ ما يمكنُ أن يحدثَ لِهاتيكَ النجوم التي تتعدّىٰ كُتَلُها هذه الحدود. وسنتناولُ الآنَ بالحديثِ الحالَ الذي تستمرُّ فيه هاتيكَ النجومُ علىٰ الانكماشِ مِن دونِ أيِّ ضغطٍ داخليٍّ ذي بالٍ لمعاكسةِ الجاذبيةِ، وكما خشيَ أدنغتون بالضبط.

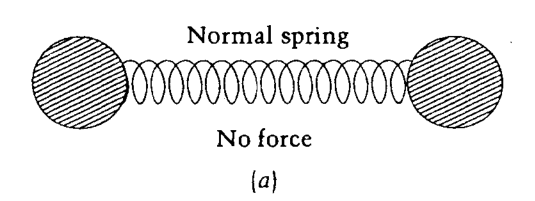
قامَ عالِمُ النسبيةِ الهنديُّ ب. دوت، ولأولِ مرّةٍ، بمناقشةِ حلٍّ لمعضلةِ كُراتِ الغبارِ المنكمشةِ، عامَ ١٩٣٨. ويعني اصطلاحُ «الغبارِ» dust هنا مادّةً مِن دونِ أيِّ ضغطٍ داخليّ. ولمّا كنّا ننظرُ في المواقفِ التي لا تتوفّرُ فيها ضغوطٌ داخليةٌ ذاتُ بالٍ لمقاومةِ الانكماشِ الجاذبيِّ، فإنَّ افتراضَ الغبارِ ليس بعيداً عن الواقع. ونلاحظُ هنا سلوكاً للجاذبيةِ غيرَ مُعتادٍ إلىٰ حدٍّ ما، وهو ما لا يوجدُ في القِوىٰ الأخرىٰ المعروفة.

ويُظهِرُ الشكلُ ٥,٢١ موقفيْنِ مختلفيْنِ، فنرىٰ في (أ) كُرَتَيْنِ يربطُ بينهما نابضٌ (زُنْبُرُكٌ) تمَّ شَدُّهُ إلىٰ أكثرِ مِن طولِه الطبيعيّ. إنّ مطاطيةَ النابضِ ستجعلُه يتقلص، وهو ما يجعلُ الكُرتيْنِ تنجذبانِ الواحدة إلى الأخرى. ولو تركناهما تقتربان كلٌّ من الثانية ببطءٍ، فإنَّ قوةَ التجاذبِ ستقِلُّ ثم ستختفي تماماً عندما يعودُ النابضُ إلىٰ طوله الطبيعيّ. ونرىٰ في (ب) كُرتيْنِ تتجاذبانِ بفِعلِ جاذبيتِهما المتبادلة. ولكنَّ قوةَ التجاذبِ لن تتلاشىٰ مع اقترابِ الكتلتيْنِ الواحدة من الأخرى، بل إنها سوف تتزايد.

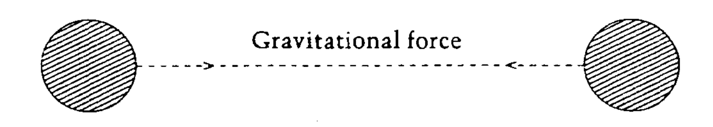
ولسوف تقِلُّ القوةُ التي تُشابِهُ النابضِ في عمله، إذا ما حدثَتْ حركةٌ تتطلبُها القوةُ. وبالعكسِ، فإنّ الجاذبيةَ تزيدُ إذا ما جَرَت الحركةُ علىٰ هواها. ولهذه الأسبابِ، فلقد شبَّهَ هيرمان بوندي الجاذبيةَ بالمستبِدِّ الذي يطلبُ المزيدَ والمزيدَ فيما لو تمّتْ تلبيةُ طلباتِهِ السابقة.

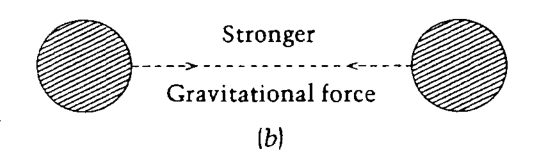
وهكذا فلقد كانت مخاوفُ أدينغتون في محلِّها. وكما أظهرَ حَلُّ دوتٍ للمعضلةِ، فإنَّ النجومَ التي لا تمتلك ضغوطاً كافيةً لمقاومة الانكماشِ سوف تجدُ نفسها تتقلصُ وتتقلصُ بصورةٍ متسارعة. ويُظهِرُ الشكلُ ٥,٢٢ كيف تتقلّصُ كرةُ الغبارِ إذا ما ابتدأتْ مِن وضعِ السكون. ونلاحظُ هنا بأنَّ معدَّلَ الانكماشِ يكونُ بطيئاً أولاً، ولكنه يتسارعُ حتىٰ يُشَكِّلَ الانكماشُ جائحةً حادّة. وهذا هو السببُ في أنَّ العلماءَ يستخدمونَ عبارةَ «الانكماش الجاذبي» gravitational collapse، لوصفِ هذا الموقف.





(a)

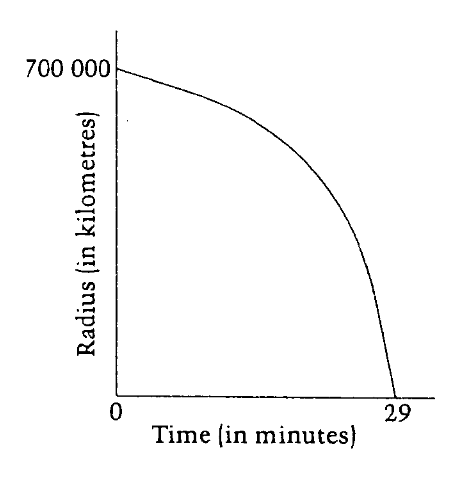




(b)

الشكل ٥,٢١ : يظهرُ هنا السلوكُ المتضادُّ للقوةِ المطاطيةِ وقوةِ الجاذبية (انظرْ مَتْنَ الكتابِ للتفاصيل).

ولقد اعتبرْنا كتلةَ الغبارِ، في الشكلِ ٥,٢٢، مساويةً لكتلةِ الشمس، حتىٰ تثبُتَ الفكرةُ لدينا. ونرىٰ هنا أنّ الكرةَ كلَّها تنكمشُ إلىٰ نقطةٍ، في خلالِ ٢٩ دقيقة. ولكننا نحتاجُ إلىٰ ملاحظتيْنِ تحذيريتيْنِ اثنتيْنِ، عند النظرِ إلىٰ الشكل ٥,٢٢. وأولاهُما أنّ الشمسَ ذاتَها لن يصيبَها هذا المصيرُ أبداً، إذ لمّا كانت كتلتُها دونَ حدِّ شاندراسيكار، فإنها سوف تستقِرُّ علىٰ حالةِ نجم قزم أبيض white dwarf star. وأمّا الملاحظةُ الثانيةُ فهي أكثرُ أهميةً مِن الأولىٰ. نحنُ نتذكَّرُ بأنه لا يوجدُ لنظريةِ النسبيةِ زمنٌ مطلق. إذاً، ما هو الزمنُ الذي سنستخدمُه في رسم مخططِ الشكل ٥,٢٢؟ وبأيةِ ساعةٍ نقيسُ الوقتَ الذي سوف تستغرقُه كرةُ الغبار، وهو ٢٩ دقيقةً، حتىٰ تنكمشَ؟ لسوفَ نوضّحُ هذه النقطةَ في القِسم القادم.

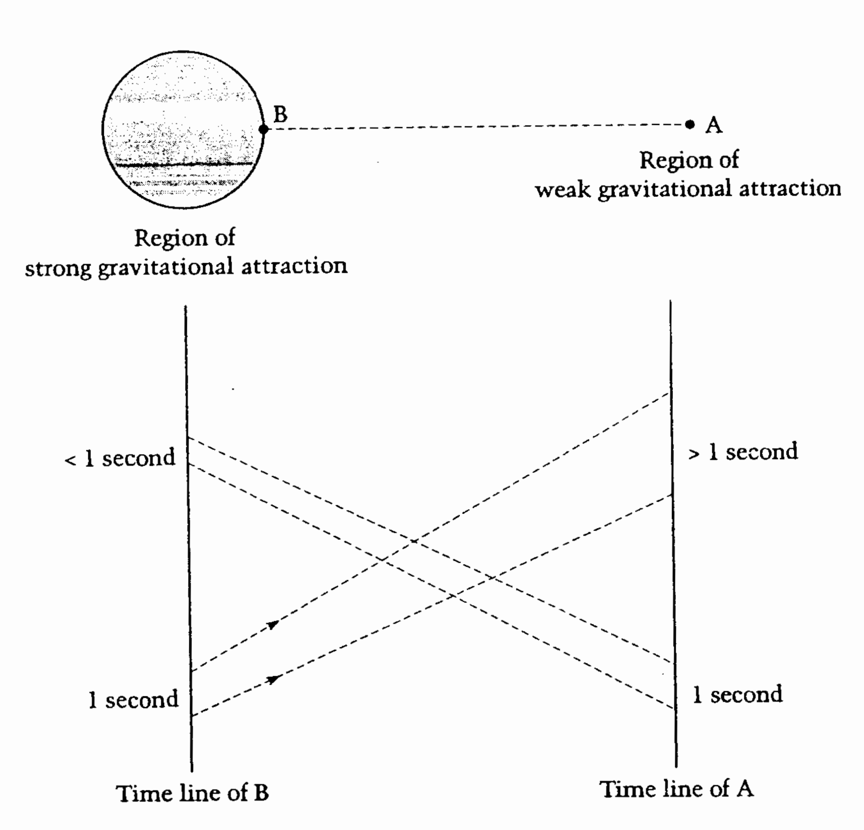


الشكل ٥,٢٢: انكماشٌ لكرةٍ مِن الغبارِ تساوي كتلتُها كتلةَ الشمس. إنَّ الانكماشَ هنا بطيءٌ أولاً، ولكنه يتسارعُ مع مرورِ الوقتِ، حتىٰ إنَّ الكرةَ تنكمشُ إلىٰ نقطةٍ في حوالىٰ ٢٩ دقيقة.

تمدُّدُ الزمنِ Time dilatation بسببِ الجاذبية

إنّ تأثيرَ الجاذبيةِ، حَسَبَ آينشتاين، لا يُحَسُّ به في الفضاءِ وحدَه، بل وفي الزمانِ أيضاً. ويظهرُ ذلك واضحاً مِن المعدَّلاتِ المختلفةِ التي تدورُ بها الساعاتُ في المناطقِ المختلفةِ. وحتىٰ نكونَ أكثرَ تحديداً، فلننظرْ إلىٰ الراصدَيْنِ A و B (الشكل ٥,٢٣)، في مناطقَ مختلفةٍ مِن الفضاء. ويوجدُ علىٰ القربِ مِن A، تأثيرٌ جاذبيٌّ ضعيفٌ جداً، بحيثُ إنّ هندسةَ الزّمْكانِ تكادُ أن تكونَ إقليديةً. أمّا قُرْبَ B، فإنَّ تأثيرَ الجاذبيةِ يكونُ قوياً. فلنفترضْ أنْ لا تَغَيُّرَ في الوضعِ مع الزمانِ ـ أي أنّ الموقفَ ساكِنٌ static. ولنفترضْ أنّ A و B يتّصلانِ الواحد مع الآخَر بأشعةِ الضوء، وأنهما يقرّران أن يستخدما ساعةً ذريةً، كلٌّ في منطقته، باعتبارها أدواتٍ لقياسِ الزمن. نحنُ نتوقعُ، مِن خبرتِنا اليومية، أنه لو قام الراصدُ A بإرسالِ إشاراتٍ في كلِّ ثانيةٍ باستخدامِ ساعته، فإنّ الراصدَ B سوف يستلمُها في كلِّ ثانية، والعكسُ بالعكس. ولكنَّ هذا ليس هو ما يحدثُ فعلاً، فالإشاراتُ التي يبعثُها الراصدُ A تبدو للراصدِ B وهي تجيءُ في فتراتٍ **أقلّ** مِن الثانية. وبالعكس، فبالنسبةِ إلى الراصدِ A فإنَّ الإشاراتِ القادمةَ مِن الراصدِ B تجيءُ في فتراتٍ تزيدُ علىٰ الثانيةِ الواحدة.

ومِثْلُ هذا الموقفِ يمكنُ أن ينشأَ، فلكياً. ويمكنُنا أن نُمَثِّلَ للمنطقةِ القريبةِ مِن A بالأرض، وللمنطقةِ القريبةِ مِن B بِجرْمٍ عظيمٍ مُدَمَّجٍ (مُتَضامٍّ). ولسوف تبدو الساعاتُ الموضوعةُ علىٰ الجِرمِ العظيم، للناظرِينَ إليها مِنَ الأرضِ، وهي تسيرُ بصورةٍ أبطأ. وبطبيعةِ الحالِ، فإننا لا نرىٰ الساعاتِ وهي تُسرعُ أو تُبطِئ، ولكننا، وبدلاً مِن ذلك،



الشكل ٥,٢٣ : إنّ مقاييسَ الزمانِ، لراصدَيْنِ يقعُ أحدُهما في حقلِ جاذبيةٍ قويٍّ، والآخَرُ ليس كذلك، مختلِفَةٌ، وكما يظهرُ مِن الإشاراتِ الضوئيةِ المتبادلة.

نرىٰ تغيّراتٍ في تردداتِ الخطوطِ الطيفية، لأنها تعكسُ التغيّراتِ الزمنيةَ في الأنظمةِ الذرية في المصدر. وهكذا، ففي المثالِ أعلاهُ سوف يبدو تردّدُ الضوءِ القادمِ من الجِرمِ المتضامِّ العظيم منخفضاً، وطولهُ الموجيُّ وقد ازداد. ولمّا كان الجزءُ المرئيُّ مِن الطيفِ يتراوحُ بين البنفسجيِّ في الموجاتِ القصيرة والأحمرِ في الموجاتِ الطويلةِ، فإنَّ الزيادةَ في الأطوال الموجية كلِّها سوف تسبّبُ مَيَلانَ الطيفِ كلِّهِ نحو النهايةِ الحمراء. وتُعرَفُ هذه الظاهرةُ **بالمَيَلانِ للأحمرِ**، **أو الإزاحة الحمراء red - shift**، ولأنها تحدثُ بسببِ الجاذبيةِ، فإنها يُنظَرُ إليها باعتبارها **الإزاحة الحمراءَ للجاذبيةِ gravitational redshift**.

ويمكنُنا أن ننظرَ إلىٰ هذه الظاهرةِ مِن زاويةٍ مُجهريةٍ أيضاً. إذ يُنظَرُ إلىٰ الضوءِ، أيضاً، علىٰ أنه حَشْدٌ مندفعٌ من الجسيماتِ يُعرَفُ **بالفوتونات photons**. وكما رأيْنا في الفصلِ الثاني، فإنَّ طاقةَ الفوتونِ تتناسبُ مع تردده. ولمّا كان الترددُ يقِلُّ مع الإزاحةِ

الحمراءِ للجاذبية، فإنّ الفوتونَ سوف يفقدُ مِن طاقته. والسببُ في ذلك هو أنّ على الفوتونِ أن يصرفَ طاقةً للإفلات مِن التأثيرِ الجاذبيِّ القويِّ للكتلةِ الكبيرة.

لنفترض أنّ لديْنا جسماً كروياً ذا كثافةٍ متجانسةٍ يعروهُ الانكماشُ. فلننظرْ إلىٰ الجسيمِ النموذجيِّ B علىٰ سطحِ هذا الجسمِ، ولندرسْ حركتَه نحو الداخل. ويوجدُ، لغرضِ المقارنةِ، الراصدُ الخارجيُّ A الذي يقعُ بعيداً جداً عن الجسم، وخارجَ نطاقِ تأثيرِهِ الجاذبيِّ عملياً. وإذا ما انكمشَ الجسمُ، فلسوفَ تزدادُ قوةُ الجاذبيةِ علىٰ مقربةٍ منه، ويبدأ أثرُ الإزاحةِ الحمراءِ للجاذبيةِ باكتسابِ الأهميةِ. فلنفترض أنّ A و B يتّصلُ أحدُهما بالآخرِ كما وصفنا. إنّ الموقفَ هنا ليختلفُ في ناحيةٍ واحدة، فبينما أنّ A هو في وضعِ السكون، فإنَّ B يتحركُ نحو الداخلِ بعيداً عن A. إنَّ هذا يؤدي إلىٰ نتائجَ مثيرة.

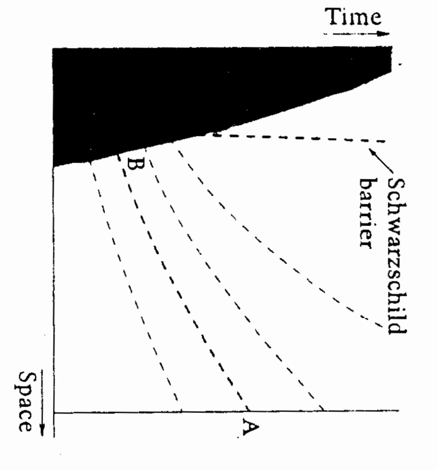
وكما في الحالةِ الساكنةِ، فستبدو ساعةُ B بطيئةً للراصدِ A. وينشأُ هذا الأثرُ، في تلك الظروفِ، لسببيْنِ اثنيْنِ: أولُهما الإزاحةُ الحمراءُ للجاذبية، وثانيهما تأثيرُ دوبلر Doppler effect، لأنَّ B يبتعدُ عن A. إنَّ تأثيرَ دوبلر ينطبقُ علىٰ حركةِ الموجةِ عامّةً. ويبدو ذلك واضحاً في حالةِ الأمواجِ الصوتية. إنّ صافرةَ ماكنةِ القطارِ المقتربةَ منّا تبدو ذاتَ نغمةٍ (طبقةٍ صوتية) مرتفعةٍ high - pitched، ولكنها تتحولُ إلىٰ نغمةٍ منخفضةٍ حالما تمرُّ بنا الماكنةُ وتبدأُ بالابتعاد. وإذا طبّقْنا ذلك علىٰ الضوء، فإنه يعني انخفاضَ تردّدِ المصدرِ المبتعدِ وزيادةَ طولهِ الموجيّ. وهكذا فلسوف تكونُ لدينا أيضاً إزاحةٌ حمراء.

ولذا فإنّ الإزاحةَ الحمراءَ للجاذبيةِ، والإزاحةَ الحمراءَ لدوبلر، سوفَ يُضافانِ الواحدة إلى الأخرى، بالنسبةِ إلى الإشاراتِ القادمةِ مِن B نحو A. ولكنَّ الوضعَ سوف يكونُ مختلفاً في حالةِ الراصدِ B. إنَّ تأثيرَ دوبلر ينحو إلىٰ تقليلِ تردّدِ الإشاراتِ مِن A بينما ينزعُ تأثيرُ الجاذبيةِ إلىٰ زيادة تردّدها. وهكذا فإنَّ ساعةَ A تبدو بطيئةً أو سريعةً للراصدِ B اعتماداً علىٰ كونِ التأثيرِ الجاذبيِّ أقلَّ أو أكبرَ أهميةً مِن تأثيرِ دوبلر. وهكذا فإنَّ مِن الواضحِ أنَّ مقاييسَ الزمنِ بالنسبة إلىٰ A و B مختلفة. فلنتمهّلْ قليلاً، حتىٰ نستمرّ في دراسةِ الموقفِ، مِن وجهةِ نظرِ كلٍّ مِن A و B.

وفيما يخصُّ B، يوجدُ انكماشٌ مستمرٌّ نحو حالةٍ مِن الكثافةِ اللامتناهية infinite density. والنتيجةُ المثيرةُ للاهتمام هي أنّ معدّلَ انكماشِ الجسم، بالمقياسِ الزمنيِّ

لِـ B، يتبعُ القاعدةَ ذاتَها تماماً، وكما هو الحالُ في القوانينِ النيوتنية. وهكذا فإنَّ نجماً بكتلةِ الشمسِ وبنصفِ قطرِها، مَقيساً علىٰ ساعةِ B (ولكنْ مِن دونِ أيِّ ضغطٍ، وبمادةٍ متجانسةِ الكثافة) لسوف ينكمشُ إلىٰ نصفِ قطرٍ يبلغُ صفراً، بعد ٢٩ دقيقة. وهذا يجيبُ علىٰ السؤالِ الذي طرحناهُ في نهايةِ القسمِ السابق. وعلىٰ أيةِ حالٍ، فإنَّ التماثلَ مع الحالةِ النيوتنيةِ ينتهي هنا، وثمَّةَ نتائجُ شديدةُ الوَطأةِ مخبّأةٌ للراصدِ B. إذ بينما تصبحُ المادةُ في الجسمِ المنكمشِ أكثرَ وأكثر كثافةً، فإنَّ خصائصَ الزّمْكانِ الهندسيةَ تصيرُ أكثرَ وأكثرَ غرابةً (أي أنها تصبحُ لاإقليدية)، حتىٰ تصلَ إلىٰ حالةِ الكثافةِ اللامتناهية. وفي تلك المرحلةِ ينهارُ الوصفُ الهندسيُّ جميعاً، لأنَّ مِثْلَ هذا الوصفِ يتضمّنُ عملياتٍ حسابيةً تشملُ الصِّفرَ واللانهاية، وهي عملياتٌ لا يمكنُ تحديدُها بالدّقّةِ اللازمة. وهذه حالةٌ لـ «الفَرْدانيةِ» singularity تُشابِهُ جداً تفرّدَ أو خصوصيةَ الكونِ الناجم عن الانفجارِ الكبير big bang universe، وهو ما سنراهُ في الفصلِ السابع، باستثناءِ أنَّ الكونَ **ينفجرُ، في حالةِ الانفجارِ الكبيرِ، إلىٰ الخارج explodes**، انبثاقاً من حالةٍ كثيفةٍ بصورةٍ لامتناهيةٍ، بينما **ينفجرُ** الجسمُ هنا **إلىٰ الداخل implodes** مكوِّناً حالةً كثيفةً غيرَ متناهية.

وماذا يرىٰ الراصدُ A، خلالَ هذه الفترة؟ هل إنه يرىٰ الراصدَ B ساقطاً في الفردانيةِ؟ والجوابُ هو **كلا**، وأمَّا السببُ فهو الآتي: إنَّ الإشاراتِ الصادرةَ مِن B، تصلُ إلىٰ A، في البدايةِ، مفصولةً عن بعضِها البعض بفتراتٍ قد تكونُ أكثرَ بقليلٍ مِن الثانيةِ الواحدة. وتصبحُ هذه الفتراتُ أطولَ وأطولَ (انظرْ الشكل ٥,٢٤)، بينما ينحدرُ الراصدُ B نحو الداخلِ أكثرَ وأكثر، حتىٰ تجيءَ مرحلةٌ حرجةٌ عندما يقتربُ B مِن حاجزٍ يُعرَفُ بحاجز شوارزجايلد Schwarzschild barrier. وعندما يصِلُ B إلىٰ هذا الحاجزِ، فإنَّ الإشاراتِ الصادرةَ عنه لن تستمرَّ في الوصولِ إلىٰ A، ومهما انتظرَ A مِن وقت، ولسوف



الشكل ٥,٢٤: يبيّنُ هذا المخطّطُ للزّمْكانِ كيف أنَّ ساعةَ الراصدِ B تبطِئُ تدريجياً، وكما يشاهدها الراصدُ A، بالمقارنةِ مع الساعةِ الموضعيةِ في A. إنَّ إشاراتِ الضوءِ الصادرةَ مِن B تصلُ إلىٰ A في فتراتٍ تطولُ تدريجياً.

يكونُ مِن غيرِ الممكِن لِـ A، بعد أن يعبرَ حاجز شوارزجايلد، أن يصلَ إلىٰ المعلوماتِ التي تخصُّ B. ولكنْ يلزمُ التأكيدُ علىٰ أنه عند عبورِه للحاجزِ، فإنَّ B لن يلاحظَ أيَّ شيءٍ غريبٍ في هندسةِ الزَّمْكانِ أبداً، إذ يسير كلُّ شيءٍ بصورةٍ سلسة.

ولا بدَّ لنا مِن التأكيدِ علىٰ أنَّ حاجزَ شوارزجايلد يعملُ باتجاهٍ واحدٍ فقط، إذ إنه يمنعُ الإشاراتِ الصادرةَ في الداخلِ مِن الخروجِ، ولكنَّ الراصدَ B يستمرُّ علىٰ استلامِ الإشاراتِ مِن الراصدِ A، حتىٰ بعد عبوره الحاجزَ، وحتَّىٰ النهاية.

الثقوبُ السوداء Black holes

يمكنُنا أن نحصلَ علىٰ نصفِ قطرِ شوارزجايلد (أي نصفِ قطرِ حاجزِ شوارزجايلد الكرويِّ)، لكتلةِ الجسم M، مِن المعادلةِ البسيطةِ $2GM/c_2$، حيثُ إنَّ G هو ثابتُ الجاذبيةِ، و c هو سرعةُ الضوء. ويبلغُ نصفُ قطرِ شوارزجايلد، بالنسبة إلى الشمس، ٣ كيلومتراتٍ وحسب، وهذا أقلُّ بكثيرٍ مِن نصفِ قطر الشمسِ الحقيقيِّ الذي يبلغُ حواليٰ ٧٠٠٠٠٠ كيلومترٍ. إنَّ الشمسَ لن تصبحَ غيرَ مرئيةٍ لنا إلاَّ إذا انكمشتْ مِن حجمها الحاليِّ إلىٰ نصفِ قطرٍ يبلغُ نحواً مِن ٣ كيلومترات.

والأجرامُ التي يَقرُبُ حجمُها مِن نصفِ قطرِ شوارزجايلد غيرُ مرئيةٍ تقريباً، لأنّ الضوءَ الصادرَ عنها تحدثُ له إزاحةٌ حمراءُ كبيرةٌ، وهو يفقدُ معظمَ طاقته. وتُعرَفُ هذهِ الأجسامُ **بالثقوبِ السوداء black holes**[(١)]، وهي حسبَ التعريفِ لا يمكنُ «رؤيتُها»، ولكنْ يمكنُ الكشفُ عنها مِن خلالِ تأثيرِها الجاذبيّ. وعلىٰ سبيلِ المثال، فلو كان للشمسِ أن تصبحَ ثقباً أسودَ، فلن يعودَ في الإمكانِ رؤيتُها، ولكنها سوف تستمرُّ علىٰ جذبِ الأرض. وهكذا فإنَّ الأرض تدورُ في مدارٍ بيضويٍّ مِن دونِ مصدرٍ ظاهر!

ويمثّلُ الكشفُ عن الثقوبِ السوداءِ في الكونِ واحداً مِن أكثرِ الكشوفاتِ إثارةً في علم الفَلَك. ويمثّلُ الثقبُ الأسودُ النفيَ النهائيَّ للحقيقة المعتادةِ التي تقولُ بأنّ «الرؤيةَ هي الاعتقاد» Seeing is believing. ولـمّا كانت الثقوبُ السوداءُ لا يمكنُ رؤيتُها، فإنَّ وجودَها لا يمكنُ الاستدلالُ عليه إلاَّ بطريقةٍ غيرِ مباشرة. ولسوف نعودُ لمناقشةِ هذا الموضوعِ بعد قليل.

---

(١) يصبحُ الجسمُ، مِن وجهةِ نظرٍ رياضيةٍ، ثقباً أسودَ بالضبط، عندما يصبحُ نصفُ قطرهِ **مساوياً** لنصفِ قطرِ شوارزجايلد. ولكنْ، ومثلَما أوضحْنا أعلاه، فبالنسبةِ إلى المشاهدينَ الخارجيينَ (النوع A) أمثالِنا، فإنه لن يُمكنَ رؤيةُ أيِّ جسمٍ يصلُ إلىٰ هذهِ الحالةِ أبداً.

وقد يكونُ أهمُّ سؤالٍ يُسألُ عن الثقوبِ السوداء هو: أيُّ نوعٍ مِن الأجرامِ يمكنُ أن يصبحَ ثقباً أسود؟ نحنُ نواجهُ هنا الفرقَ بين الجاذبيةِ لنيوتن وآينشتاين.

افرضْ أنَّ لدينا جسماً أكبرَ مِن الشمس بمليونِ مرَّةٍ أو يزيد. كيف يمكنُنا أن نُحافظَ عليهِ في حالةِ توازن؟ إنَّ التفاعلاتِ النوويةَ في الشمسِ تُولِّدُ ضغوطاً داخليةً حتىٰ تتحمّلَ جاذبيتَها الذاتية. ولكننا عندما نجعل الجسمَ أكبر وأكبر، فإنَّ هذه التفاعلاتِ النووية تزدادُ بصورةٍ تتناسبُ مع الكتلةِ، بينما ترتفع قوةُ الجاذبيةِ بالتناسبِ مع **مربّع** الكتلة. ولذا، فبالنسبةِ إلىٰ جسم تبلغُ كتلتُه مليونَ مرّةً بقدرِ كتلةِ الشمس، فإنه لا يمكنُ للتفاعلاتِ النوويةِ أن تزوّدَ الضغوطَ الضروريةَ لموازنةِ قوةِ الجاذبية. وهكذا فلسوف ينكمشُ مِثلُ هذا الجسم، ويصيرُ ثقباً أسود، ما لَمْ تتدخلِ الطبيعةُ، في أثناءِ عمليةِ الانكماشِ، للحيلولةِ دونَ هذا المصير، ومثلَما توقّعَ أدنغتون، حيثُ إنَّ الجسمَ يتمزقُ علىٰ نحوٍ ما، فيتجزأُ إلىٰ قِطَعٍ أصغر.

فهل يمكنُ لشيءٍ ما أن يَحولَ دونَ حدوثِ الانكماشِ الجاذبيِّ لِجِرْمٍ عظيمِ الكتلة؟ يمكنُنا أن نتصوّرَ، في النظريةِ النيوتنيةِ، قوّةً ما «جديدةً»، ذاتَ ضغوطٍ قويّةٍ تكفي لإيقافِ الانكماش. أما في نظريةِ آينشتاين، فإنّ الوضعَ مختلفٌ، إذ إننا حتىٰ لو نجحنا في استنباطِ قوةٍ كهذه، فإنَّ ضغطَها لا بدَّ أن يتولدَ دائماً من طريقِ الطاقة. إنَّ هذه الطاقةَ، والتي تُكافِئُ في نظريةِ النسبيةِ الكتلةَ، هي ذاتُها جاذبةٌ، فهي تُساعدُ مِن ثَمَّ علىٰ حدوثِ الانكماش. ولقد أظهرَتِ البحوثُ التي قام بها العالِمانِ روجر بنتوس وستيڤن هوكنغ، في أواخرِ ستيناتِ القرنِ العشرين، أنهُ بوجهٍ عامٍّ، وما لم نَقُمْ بإدخالِ قِوىً جديدةٍ **بطاقةٍ سالبةٍ negative energy**، فإنَّ السقوطَ إلىٰ الفَرْدانيةِ singularity هو مصيرٌ لا مناصَ منه بالنسبةِ إلى أكثرِ المنظوماتِ الفيزياويةِ التي انكمشت للتَّوِ إلىٰ ما هو أبعدُ مِن حدٍّ مُعيَّن. وهكذا، فإنّ انهيارَ (انكماشَ) B، في المثالِ الذي شرحناهُ، إلىٰ الفَرْدانيةِ لا يمكنُ الحؤولُ دونَه، حالَما يكونُ قد عَبَرَ حدَّ شوارزجايلد.

هل إنَّ الفردانياتِ مرغوبٌ فيها، في النظريةِ الفيزياوية؟ إنَّ علماءَ الفيزياءِ والرياضياتِ لا يتقبّلونَ هذه الفكرةَ كثيراً، وهم يعتبرونَها مؤشراتٍ علىٰ عدم كمالِ النظرية. وهكذا يمكنُنا أن نأخذَ بالرأيِ الذي يقولُ بأنَّ الفردانياتِ غيرُ مرغوبٍ فيها في نظريةِ النسبيةِ العامة، وعلينا أن نبحثَ عن نظرياتٍ «أفضل». ولكنَّ هناك رأياً آخرَ قد يكونُ السببَ في ظهورِه عَدَمُ وجودِ نظرياتٍ أفضل، وهو يتلخصُ في أنَّ الفردانياتِ

تقودُنا إلىٰ تُخوم الفيزياءِ، وأنَّ وجودَها ليس موضوعاً للأخذِ والردِّ في الفيزياء. ولسوف نعودُ إلىٰ مناقشةِ هذا الموضوعِ في نهايةِ الكتاب.

هل تحتوي كوكبةُ الدجاجةِ Cygnus X-1 علىٰ ثقبٍ أسود؟

قد تكونُ كوكبةُ الدجاجةِ هي أكثر مصادرِ أشعةِ اكس المثيرةِ للاهتمام بين النجوم المزدوجة X-ray binaries، لأنَّ مِن المحتَملِ جدّاً احتواءَها علىٰ ثقبٍ أسود. ولقد تمَّ التعرفُ علىٰ مصدرِ أشعةِ اكس هذا مترافقاً مع منظومةِ نجم مزدوج، ويُعرَفُ العضوُ المرئيُّ منها بالنجم المستسعرِ المُشارِ إليه باسم Supergiant star HDE 226868. وأمّا قرينُه فلا تمكنُ رؤيتُه، ولكنْ يمكنُ الاستدلالُ علىٰ وجودِه مِن حركةِ قرينِه المرئيّ. ذلك لأننا نرىٰ القرينَ المرئيَّ يتحركُ في مدارٍ بيضويٍّ، وهذا لا يمكنُ أن يحدثَ مِن دونِ وجودِ قرينٍ له غيرِ مرئيٍّ يقومُ بجذبه. إنَّ فترةَ دورانِ منظومةِ النجمِ المزدوج، مِن خلالِ تحديدِها بصفاتها البصرية، هي ٥,٦ اليوم.

ولقد تمَّ الكشفُ، في عام ١٩٧١، عن مصدرٍ راديويٍّ ضعيف، علىٰ مقربةٍ مِن كوكبةِ الدجاجة، مِن قِبَلِ ويد ويلمنغ، وبريس، وميلي، وقد تطابقَتْ التغايراتُ في دفقِ الأشعةِ الراديوية مع التغيراتِ في دفْقِ الأشعة السينية «أشعة اكس»، وهو ما أدّىٰ إلىٰ الاعتقادِ بأنّ مصدرَ الأشعةِ السينية وأشعةِ الراديو هو جسمٌ واحدٌ لا غير. وفي الحقيقة، فإنَّ هذا الظرفَ المحظوظَ قد ساعدَ علىٰ حصرِ مصدرِ الأشعةِ السينية بمنظومةِ النجمِ المزدَوجِ البصرية. ذلك لأنَّ النجومَ المرئيةَ (ومنها النجومُ المزدوجة) شائعةُ الوجود، علىٰ العَكسِ مِن المصادرِ الراديويةِ التي هي نادرةٌ نسبياً، ولهذا فإنَّ مِن الصعبِ تحديدُ الجسم البصري المُرافقِ بالضبط، ما لَمْ يَكُنْ موقعُ مصدرِ الأشعةِ السينيةِ معروفاً وبكلِّ دقة. ورغمَ أنَّ مَراقبَ (تلسكوباتِ) الأشعةِ السينيةِ الحاليةَ يمكنُ أن تحدِّدَ بالضبط مصدراً يوجدُ ضمنَ ثوانٍ قوسيةٍ قليلةٍ، فلقد تمَّ تحديدُ مصدرِ كوكبةِ الدجاجةِ، في عام ١٩٧١، مِن قِبَلِ القمرِ الصناعيِّ المعروف باسم UHURU X-ray، داخلَ مساحةٍ زاويَةٍ لا تزيدُ علىٰ أربعِ دقائقَ مربعةٍ مِن القوس. أمَّا باستخدام تقنياتِ الراديو المتوفرةِ، وهي أفضلُ بكثيرٍ، فإنَّ مِن الممكنِ تحديدُ مكانِ المصدرِ بدِقَّةٍ أكبرَ بكثيرٍ، داخلَ مساحةٍ زاويّةٍ تبلغُ ثانيةً مربعةً قوسية واحدة.

وهكذا فلقد صارَ مِن الممكنِ أن نُحدِّدَ النجم HDE 226868، وقرينَه غيرَ المرئيِّ، باعتبارِهما منظومةَ النجمِ المزدوج التي تولِّدُ الأشعةَ السينيةَ من كوكبةِ الدجاجة. ولقد

أكّدَ، بعدئذٍ، كاشفُ الأشعةِ السينيةِ في مرصدِ آينشتاينَ، وهو أكثرُ دِقّةً، هذا التشخيصَ.

إنَّ القرينَ المرئيَّ في منظومةِ النجمِ المزدوجةِ هو نجمٌ مِن نوعِ (B - Type star) B. والنجومُ مِن هذا القبيلِ، مِن النوعِ B، في نظامِ تصنيفِ أطيافِ النجوم، تكونُ عظيمةَ الحجمِ ومُضيئةً (انظرْ الفصلَ الثاني). ولقد تـمَّ تقديرُ كتلةِ HDE 226868، مِن خلالِ المعلوماتِ العامةِ حولَ كُتَلِ هذه النجومِ، بعشرينَ كتلةً شمسيةً **علىٰ الأقلّ**. إنَّ فترةَ دورانِ النجمِ المزدوج تبلغ ٥,٦ اليوم. كما ويمكنُ أيضاً تقديرَ سرعةِ القرينِ في الاتجاهِ الشعاعيّ. وباستخدامِ قانونِ نيوتنَ للجاذبيةِ، فإنَّ مِن الممكنِ تقديرُ كتلةِ القرينِ غيرِ المرئيِّ بخمسةِ أضعافِ كتلةِ الشمسِ **علىٰ الأقل**. والسبب في قولنا «علىٰ الأقل» هو أننا لا نَقَعُ بالضرورةِ في المستوىٰ المَداريِّ لمنظومة النجمِ المزدوجةِ، وأنّ تقديرَنا لكتلةِ القرينِ المتوسعةِ هو الحدُّ الأدنىٰ. وهكذا فلا يمكننا أن نُخمِّنَ كتلةَ الجسم المتضامّ علىٰ وجهِ الدقةِ، ولكنْ يمكنُ أن نخمنَ الحدَّ الذي يتوجبُ علىٰ الكتلةِ أن تتعدّاه.

ولكنْ حتّىٰ الحَدُّ الذي يتكونُ مِن خمسةِ أضعافِ كتلةِ الشمسِ هو أعلىٰ بكثيرٍ مِن حدِّ كتلةِ النجمِ النيوترونيِّ الذي ناقشناهُ في الفصلِ الرابع. وماذا يمكنُ أن يكونَ هذا الجِرمُ المُتَضامُّ، إذا لم يكنْ نجماً نيوترونياً؟ إنَّ مِن المعلوم أيضاً أنّ الأشعةَ التي تترافقُ مع النجومِ المزدوجةِ تتقلّبُ شدّتُها بسرعة. ويمكنُ ترجمةُ زمنِ التقلباتِ، والذي يبلغُ ٠,٠٠١ مِن الثانيةِ، إلىٰ مقياسٍ للمسافةِ، بضربهِ في سرعةِ الضوءِ، وهو ما يعطي مسافةً مِن ٣٠٠ كيلومتر. إننا لنعلمُ مِن نظريةِ النسبيةِ أنه لا يمكنُ لاضطرابٍ فيزياويٍّ أن يسيرَ بأسرعَ مِن الضوء. وهكذا يُتوَقَّعُ أن يسيرَ التأثيرُ الفيزياويُّ لأيِّ تغيّرٍ كبيرٍ، داخلَ المصدر، بسرعةٍ أقلّ مِن سرعةِ الضوء. ولذا فإنَّ أيَّ عمليةٍ فيزياويةٍ متماسكةٍ تتسبّبُ في حدوثِ تقلباتٍ تصلُ سرعتُها إلىٰ واحدٍ مِن ألفٍ مِن الثانيةِ لا يمكنُ أن تمتدَّ عَبْرَ منطقةٍ تزيدُ علىٰ ٣٠٠ كيلومترٍ حجماً.

وإذا ما تذكّرْنا، مِن الفصلِ الرابع، كيف تنشأُ النجومُ وتتطورُ، فلسوف نرىٰ بأنَّ القَرينَ غيرَ المرئيِّ سوف يسحبُ المادةَ مِن النجمِ المرئيّ، وأن هذه المادةَ سوف تَخرُّ إلىٰ الأولِ منهما، بعد أن تدورَ حولَه لفترةٍ مِن الوقت (انظر الشكل ٥,٢٥). إنَّ هذه المادةَ التي تلفُّ لولبياً تكوِّنُ قرصاً يُعرَفُ **بقرصِ التعاظم accretion disc**. وتتولدُ الأشعةُ السينيةُ مِن تسخينِ هذا القرص. ومِمّا قد عرفناهُ توّاً، فَإنَّ قرصَ التعاظم لا بدَّ أن يكونَ صغيراً، وبقدرِ ٣٠٠ كيلومترٍ في الحجمِ، لو كان له أن يولّدَ مِثلَ هذه التقلباتِ السريعةِ في شدّةِ الأشعةِ السينية. إنَّ القيمةَ المرتفعةَ لشدّةِ الأشعةِ السينيةِ تُمَكِّنُ العلماءَ أيضاً مِن

استنتاج أنَّ المصدرَ الباعثَ يجبُ أن يكونَ جسماً متضاماً (مُدَمَّجاً) جداً.

إنَّ دلالةً مِن هذا القبيلِ تجعلُ كوكبةَ الدجاجةِ متفردةً، تقريباً، بين النجومِ المزدوجةِ الباعثةِ للأشعةِ السينية X-ray binaries. ولعدمِ وجودِ نوعٍ آخرَ مِن النجومِ المتضامّةِ يمكنُ أن يملأَ القائمةَ، فإننا نخرجُ باستنتاج مفادهُ أنّ العضوَ غيرَ المرئيّ لمنظومةِ النجم المزدوج هذه إنما هو **ثقبٌ أسود black hole**. ولو صَمَدَ هذا الاستنتاجُ، فإنَّ علمَ الفلكِ الراديويِّ X-ray astronomy يمكنُ أن يدّعيَ الفضلَ في الاكتشافِ الأولِ للثقبِ الأسود!

أثقوبٌ سوداءُ فائقةُ الكتلة؟ Supermassive black holes

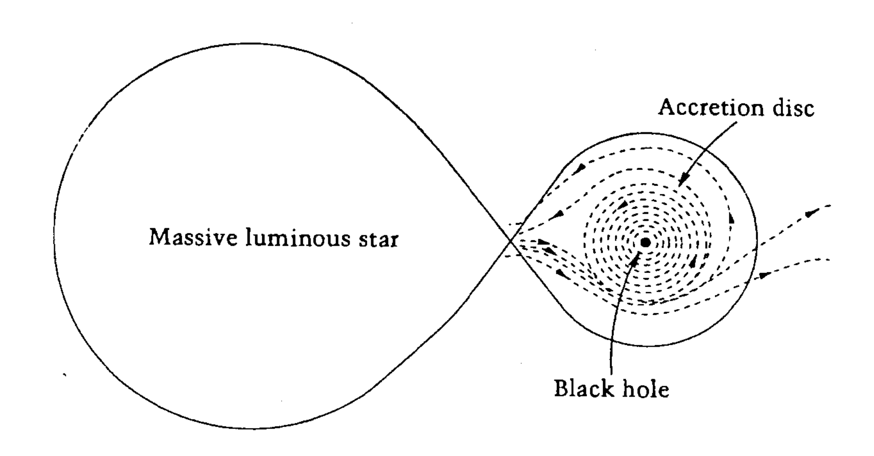
كان يمكنُ تماماً، للفقراتِ التالية، أن تكون بقلم كونان دويْل، لو كان شرلوك هولمز، وهو بوليسُه السِّريُّ الفائقُ، يُطاردُ لُغزاً كونياً:

«إنني لمتأكدٌ، يا عزيزي واطسِن، مِن أنّ ثقباً أسودَ هو المسؤولُ عن هذا الفعلِ العنيف».

وهتفتُ غيرَ مُصدِّقٍ: «ثقبٌ أسود! هل إنك متأكدٌ يا هولمز مِن أنك لم تذهب بعيداً؟» ولكنَّ صديقي هزَّ رأسَه بالنفي.

«أجَلْ، ثقبٌ أسودُ فائقُ الكتلة، ولَكَمْ أخبرتُكَ مِن قبلُ أنك إذا ما استبعدْتَ المستحيلَ، فإنَّ ما يتبقىٰ لديكَ، ومهما كان غيرَ محتَملٍ، لا بدَّ أن يكون هو الصواب؟».

لقد وَجَدَ الباحثونَ الجُدُدُ الثقبَ الأسودَ غيرَ المحتمل حلاً لمعضلةِ الطاقةِ



الشكل ٥,٢٥: نجدُ هنا وصفاً لسيناريو كوكبةِ الدجاجة. راجعِ المتنَ للتفاصيل.

الكونية[1]، علىٰ أساسِ عدمِ توفرِ حلٍّ آخَرَ أقلَّ إثارةً. وبالفعل، فلقد انتعشَتْ «صناعةُ الثقبِ الأسود»، في علمِ الفَلَكِ، بعد اكتشافِ كوكبةِ الدجاجةِ. ولقد واجَهَتْ أحداثٌ أخرىٰ علماءَ الفيزياءِ النجميةِ، حيثُ بدا أنَّ ثقباً أسودَ هو أحسنُ حلٍّ لتفسيرِ مشاهداتِ العلماء. وعلىٰ عكسِ الثقبِ الأسودِ في كوكبةِ الدجاجة، فإنَّ المرءَ لَيَحتاجُ هنا إلىٰ ثقبٍ أسودَ **فائقِ الكتلةِ supermassive**، حاوياً لمادّةِ أكثرِ مِن بَليونِ نجم.

وكما ذكرْنا للتّوّ، فلقد كانت أهمَّ قضيةٍ في هذه المشاهداتِ المثيرةِ جداً هي تفسيرُ كيفيةِ **قذفِ طاقةٍ كبيرةٍ كهذه، مِن فضاءٍ محدودٍ، وبطريقةٍ متفجّرةٍ كهذه**.

ماذا كانت تلك الأحداث؟

جاءَ أولُ مفتاحٍ لحلِّ اللُّغزِ بعدَ نهايةِ الحربِ العالميةِ الثانيةِ بقليل، ليس مِن علمِ الفلكِ القديمِ والمبنيِّ علىٰ البصر، ولكنْ مِن القادمِ الجديد، علمِ الفلك الراديويّ radio astronomy.

مصادرُ الراديو الكونية

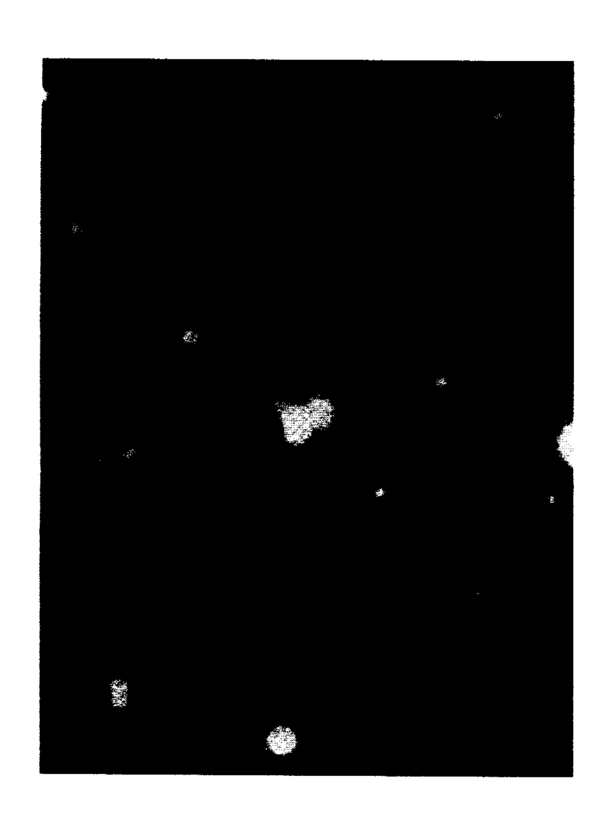
اكتشفَ جَيْ. و .فيليبس، عامَ ١٩٤٦، موجاتِ الراديو القادمةَ مِن اتجاهِ كوكبةِ الدجاجة Cygnus constellation. ولم تكنْ تقنياتُ القياساتِ الراديويةِ، عامَ ١٩٤٦، دقيقةً بما يكفي لتحديدِ موقعِ هذه الموجات. ولكنَّ غراهام سميث تمكّن، في كامبريدج، عامَ ١٩٥١، مِن أن يحصلَ علىٰ الدِقّةِ الكافيةِ لتحديد موقعِ هذا المصدرِ، مِن أجلِ تمكينِ الفلكيين البصريينَ مِن القيامِ ببحثٍ عن مصدرٍ للضوءِ المرئيِّ في المكانِ ذاته، وأُسميَ المصدرُ الراديوي باسمِ كوكبةِ الدجاجةِ A-Cygnus A.

ولقد بحثَ والتر بادي، في مراصدِ جبلِ ويلسون وبولومار، عن جِرْمٍ مثيرٍ للاهتمام، في موقع كوكبة الدجاجة ـ A، فوجده. ويُرينا الشكلُ ٥,٢٦ صورةً لهذا الجِرم، وهو يُعرَفُ الآنَ باسمِ **المجرةِ الراديوية radio galaxy**. لقد اعتقدَ بادي، في واقعِ الحال، بأنَّ الصورةَ قد أظهرَت مجرتيْنِ اثنتينِ في حالةِ تصادم، واعتقدَ بأنَّ المجراتِ في حالةِ التصادمِ سوفَ تولّدُ ذلك النوعَ مِن الطاقةِ الذي يُحتاجُ إليه لمدِّ المصدرِ الراديويِّ بالطاقة.

ومِن المثيرِ للانتباهِ أن نستذكرَ رِهاناً أجراهُ بادي مع رودولف منكاوسكي، وهو

---

(١) إنّ المعضلةَ تكمنُ، وعلىٰ نحوٍ نموذجيٍّ، في إيجادِ آليّةٍ لِنتاجٍ مِن الطاقةِ عظيم، مِن مصدرٍ مُدَمَّجٍ للغاية.



الشكل ٥,٢٦ : صورةٌ بصريةٌ للمجرةِ التي تمّ التعرفُ عليها مع المصدرِ الراديويِّ المعروفِ باسم كوكبة الدجاجة Cygnus A.

فلكيٌّ مرموقٌ في مراصدِ جبلِ ويلسون وبولومار. ولقد جرىٰ الرهانُ في نهايةِ ندوةٍ حول كوكبة الدجاجة، عندما تقدمَ منكاوسكي بملاحظاتٍ مشكّكةٍ حول نظريةِ التصادمِ التي تقدم بها بادي وسبتزر، لتفسيرِ الانبعاثِ الراديويِّ مِن كوكبةِ الدجاجة. وكان بادي واثقاً بما يكفي حتىٰ يُراهنَ علىٰ نظريته بألفِ دولار، ولكنَّ منكاوسكي أسكتَه بقنينةٍ مِن الشراب! واتفقَ الجانبانِ علىٰ أنَّ بَيِّنَةَ خطوطِ الانبعاثِ في طيفِ الغازِ في المصدرِ يتوجبُ أن يُنظَرَ إليها باعتبارها توكيداً علىٰ لزوم فكرةِ المجراتِ المتصادمة. ولقد تمَّ الحصولُ علىٰ هذا الدليلِ بعد أشهرٍ قليلةٍ، فقام منكاوسكي بتسديدِ الرِّهان. ولكنَّ بادي تشكّىٰ فيما بعد مِن أنَّ منكاوسكي نفسَه قد أجهزَ علىٰ الشرابِ الذي أعطاهُ لتسويةِ الرِّهان!

ودلّتِ الأحداثُ التاليةُ علىٰ أنّ الحقّ في ذلك كان مع منكاوسكي، لأنَّ الشواهدَ التاليةَ أكّدَتْ شكوكَه في نظريةِ الاصطدام. ونحن نعلمُ الآنَ أنَّ كوكبةَ الدجاجةِ **لا يعود** انبعاثُها الراديويُّ إلىٰ اصطدامِ مجرتيْنِ اثنتينْ. وما يحدثُ في كوكبةِ الدجاجةِ هو بالحقيقةِ خصيصةٌ مميزةٌ لأكثرِ المصادرِ الراديويةِ التي تقعُ خارجَ مجرّتنا، وقد تمَّ اكتشافُ هذهِ الحقيقةِ منذُ عامِ ١٩٥١. إنَّ الشواهدَ المفصّلةَ في مثلِ هذه الحالاتِ لا تشيرُ إلىٰ حدوثِ

اصطدام، بل إلىٰ انفجارٍ في مركزِ المصدرِ الراديويّ، وهو انفجارٌ يقذفُ بجسيماتٍ مشحونةٍ كهربائياً باتجاهاتٍ متعاكسةٍ، وكما يظهرُ في الشكل ٥,٢٧. إنَّ هذه الجسيماتِ السريعةَ تسيرُ مسافةً معيَّنةً مِن المصدرِ ثم تشِعُّ، مِن بعدِ ذلك، بوجودِ الحقلِ المغناطيسيّ في تلك المنطقة. ما هي العمليةُ التي تؤدِّي إلىٰ قذفِ الجسيماتِ السريعةِ مِن المصدرِ الراديويِّ؟ ومِن أين يستمدُّ المصدرُ قوّتَهُ الهائلة؟

معضِلةُ الطاقة

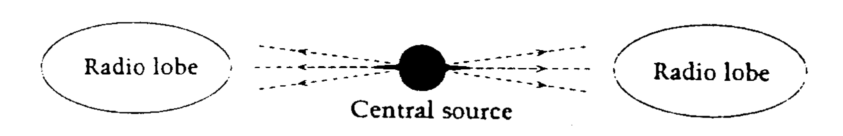
كانت الأسبابُ الأولىٰ التي أدّتْ إلىٰ أن تحومَ الشكوكُ حولَ نظريةِ المجراتِ المتصادمةِ للمصادرِ الراديويةِ، مِثْلَ كوكبةِ الدجاجةِ، نظريةً بحتة، فلقد قامَ جيوفري بيربج، في أواسطِ الخمسيناتِ مِن القرنِ العشرين، بتقديم مناقشةٍ ممتازةٍ لتقديرِ الطاقةِ المختزَنةِ في مصدرٍ راديويٍّ قويٍّ ككوكبةِ الدجاجةِ. ولقد أخذَتْ حساباتُ بيربج كلَّ الخصائص الملاحَظةِ علىٰ الموجاتِ الراديويةِ القادمةِ مِن كوكبِ الدجاجة، بنظرِ الاعتبار، ومِن ضمنِها شِدَّتُها وطيفُها، ثم هو قامَ بتقديمِ فرضيةٍ تقولُ بأنَّ الإشعاعَ كان قادماً مِن جُسيماتٍ سريعة الحركةِ ومشحونةٍ كهربائياً، وهي يتمُّ تعجيلُها مِن قِبَلِ الحقلِ المغناطيسيِّ في المصدرِ الراديوي.

وكان بإمكانِ بيربج أن يُقدِّرَ، مِن المعطَياتِ المتوفرة **أدنىٰ** طاقةٍ يتوجبُ تواجدُها بالضرورةِ في الجسيماتِ، وفي الحقلِ المغناطيسيِّ، حتّىٰ تُحافِظَ علىٰ إشعاعها الملاحَظِ. والطاقاتُ الكليةُ النموذجيةُ في هاتيْنِ الحالتيْنِ متشابهةٌ، وهي تصلُ إلىٰ رقم مُذهِلٍ، وحتىٰ بالمقاييسِ الفلكية. إنَّ الطاقةَ المحتاجةَ تتجاوزُ، وبكثيرٍ، الطاقةَ النموذجيةَ المخزونةَ في مجرّةٍ اعتياديةٍ للنجوم كمجرتِنا نحن. وأمّا بالمقاييسِ الأرضيةِ، فإنها تساوي ما يقربُ مِن عشرةِ آلافِ بليونِ بلَيونِ بليونِ بليونِ مرّةٍ قَدْرَ الطاقةِ المتحررةِ مِن انفجارِ قنبلةٍ هايدروجينية تبلغُ قوّتُها ميغاطُناً واحداً! megaton H - bomb[١].

كم يمكنُ لاثنتيْنِ مِن المجراتِ المتصادمةِ أن تُنتجا مِن الطاقة؟ لقد اعتمدَتْ نظريةُ التصادم علىٰ تحويلِ طاقةِ الجاذبيةِ لمجرتيْنِ تتصادمانِ إلىٰ طاقةِ موجاتٍ راديوية. أي أنَّ طاقةَ الجاذبيةِ لسوف تُستخدَمُ، في عمليةِ الاصطدام، لتعجيلِ جُسيماتٍ مشحونةٍ إلىٰ سُرْعاتٍ عاليةٍ، بحيث يصيرُ في إمكانِها أن تشِعّ. ولكنَّ الحساباتِ المفصّلَةَ أظهرَتْ أنَّ

---

(١) ميغا ـ = مليون.
الميغاطُن: هو قوّةٌ انفجاريةٌ تعادلُ انفجارَ مليونِ طُنٍّ مِن ثالثِ نتريت التولين. د.س



الشكل ٥,٢٧ : رسمٌ تخطيطيٌ، لمصدرِ راديويٍّ نموذجيٍّ يقعُ خارجَ المجرّة. إن المنطقةَ المركزيةَ منه تقومُ بقذفِ جسيماتٍ سريعةٍ، وتقوم هذهِ بإشعاعِ موجاتٍ راديويةٍ مِن فِصَّيْنِ يقعانِ في جهتيْنِ متعاكستيْنِ مِن المصدرِ المركزي.

هذه العمليةَ يمكنُ أن تُنتجَ واحداً مِن ألفٍ مِن الطاقةِ المطلوبة! وهكذا، ورغم الإثارةِ المتوقعةِ، لاصطدامِ المجراتِ، فإنها ليست بالقوّةِ التي تكفي لإدامةِ مصادرَ راديويةٍ مِثْلَ كوكبةِ الدجاجة.

ولقد أظهرَت المشاهَداتُ بعدَ ذلك، وفي أوائلِ ستّيناتِ القرنِ العشرين، الصورةَ التي تظهرُ في الشكل ٥,٢٧. ولم يأتِ الانبعاثُ الراديويُّ مِن المجرةِ المركزيةِ، ولكنْ مِن فصوصٍ تقعُ علىٰ بُعدِ مئاتِ الآلافِ مِن السنين الضَوئية منها. ما هو نوعُ ماكنةِ الطاقةِ التي يمكنُ أن تَمُدَّ الجسيماتِ بالطاقةِ، حتىٰ ترتحلَ إلىٰ مثلِ هذه المسافاتِ، وتشعَّ؟

إنَّ أيَّةَ نظريةٍ حديثةٍ للمصادرِ الراديويةِ لا بدَّ أنْ تأخذَ في الحُسبانِ بِنْيَتَها المزدوجةَ، وانفجارَها المركزيَّ، ومخزونَ الطاقةِ الكبير الضروريَّ لإدامةِ إشعاعِ المصادر. وقبل أن ننظرَ في الاحتمالاتِ الممكنةِ لذلكَ، فلننظرْ في أمرِ صنفٍ آخَرَ لأجسامٍ تلفتُ النظر حتى بأكثر من ذلك.

لقد صارَ مِن الواضحِ، منذُ الأيامِ الأولىٰ لعلمِ الفلك الراديويِّ radioastronomy، وهو ما تمثّلَ في كوكبةِ الدجاجةِ، أنَّ مِن الممكنِ الحصولَ علىٰ تقدّمٍ كبيرٍ في فهمِ المصادرِ الراديويةِ، مِن خلالِ التعرّفِ عليها بصرياً. وتتضمنُ هذه العمليّةُ تحديدَ موقعِ الجسمِ، بمساعدةِ المَراقبِ البصرية، في منطقةٍ هي مِن القُرْبِ مِن المصادَرِ الراديويةِ بما يكفي للقولِ بأنّ المصدرَ الراديويَّ والجسمَ البصريَّ ينتميانِ إلىٰ المنظومةِ ذاتِها. وحتىٰ تنجحَ هذه العمليةُ، فلا بدَّ أن يكونَ موقعُ الجسميْنِ كليهما معروفاً، وبدِقّةٍ كافية.

حاولَ العلماءُ، في مُقتبَلِ سِتّيناتِ القرنِ العشرين، أن يقيسوا موقعَ المصدر، باستخدامِ احتجابِ المصدرِ الراديويِّ المتسبِّبِ عن القمر. إنَّ مسارَ القمرِ معروفٌ بدقّةٍ متناهيةٍ، وتساعدُ عمليةُ الاحتجاب تلكَ، مِن خلالِ تسببِ انخفاضٍ ملحوظٍ في شدّةِ المصدر، علىٰ تحديدِ موقعِ المصدرِ خلفَ القمر. لقد كانت تلكَ هي الوسيلةَ التي

استُخدمَتْ، عامَ ١٩٦٢، بمساعدةِ المِرْقابِ الراديويِّ في پاركيز، بأستراليا، مِن قِبَلِ سيرِل هازرْد، ولقد نجحَ هو ورفاقه، ماكي وشيمنْس، في تحديدِ موقعِ المصدرِ الراديويِّ المعروفِ بإشارةِ $_3C_{273}$ (المصدر ٢٧٣ في فهرسِ كامبريدجَ الثالثِ). كانت تلك ملاحظةً أساسيةً، وأما وقد أدركَ الباحثونَ أهميتَها المحتملةَ، فلقد حملوا معلوماتٍ **متطابقةً**، في رحلتيْنِ جويتيْنِ منفصلتيْنِ، مِن پاركيز إلىٰ سِدني، فيما لو. . . ! ثم أصبحَ التعرّفُ البصريُّ علىٰ $_3C_{273}$ بعد ذلكَ ممكناً، وكان للجسمِ البصريِّ الذي وُجدَ علىٰ مقربةٍ مِن المصدرِ مظهرٌ أشبهُ بمنظرِ النجم (انظرْ الشكل ٥,٢٨).



الشكل ٥,٢٨ : إنَّ $_3C_{273}$ هو أوّلُ كوازارٍ يتمُ التعرّفُ عليه، وهو متوهجٌ بدرجةٍ غيرِ مألوفة. وتُظهِرُ هذه الصورةُ المركبةُ مِن الصُوَرِ الأصلية، وكما بَدَتْ في ألواحِ Palomar Sky Survey، مَلْمَحاً لفيضٍ دافق. ولقد أظهَرَتْ صورٌ حديثةٌ لِمرْقابِ إيسو، في لاسيلا، بتشيلي، هذا الدَّفقَ جليّاً، مع توهُّجٍ مشوَّشٍ حول النواةِ الساطعة، كما أظهرَ مِرقابُ هابل الفضائيُّ Hubble Space Telescope صُوَراً توضّحُ البِنيةَ المفصّلَةَ لذلك الدَّفق.

وفي واقعِ الحالِ، فلقد اعتُقِدَ، خطأً، مِنْ قَبْلُ، بأنّ ذلك المصدرَ هو نجمٌ راديويٌّ في مجرّتنا، ولم تتبيّنْ طبيعتُه غيرُ الاعتياديةِ إلاّ عندما قام مارتِن شميدت، في مراصدِ هيل بكاليفورنيا، بفحص طيفِه. كان الطيفُ **مختلفاً جداً عن طيفِ النجم الاعتياديّ**، لأنه أظهرَ خطوطاً للانبعاث في إزاحةٍ حمراءَ كبيرةٍ. وهكذا فلقد استنتج شميدت، بناءً علىٰ هذا التحليل، بأنّ المصدرَ $3C_{273}$ يبعدُ أكثرَ بكثيرٍ مِن حدودِ مجرّتِنا، وأنَّ كتلتَه تصلُ إلىٰ **مليون مرّةٍ** علىٰ الأقلّ ككتلةِ نجمٍ نموذجيٍّ مِثلَ شمسِنا. وسوف نتطرّقُ إلىٰ قانونِ هابل Hubble law، في الفصلِ السابعِ، والذي ناسبَ شميدت بوساطتِهِ بين الإزاحةِ الحمراءِ وبين المسافة.

كان ذلك الجِرمُ، ومصدرٌ راديويٌّ آخرُ يُشارُ له بالرمزِ $3C_{48}$، أوّلَ جِرميْنِ فلكيّيْنِ مِن صنفٍ جديدٍ تمَّ اكتشافُهما في عام ١٩٦٣. وكان كلاهُما أشبَهَ شيءٍ بالنجمِ في مظهرِهما، ولكنَّهما كانا أعظمَ كتلةً مِن النجوم بكثير، وبأطيافٍ غريبةٍ وضعتْهُما أبعدَ بكثيرٍ، وكثيرٍ جداً، من نجومِ مجرّتنا، وكان كلاهُما باعثاً للأشعةِ الراديويةِ، وكانت هذه الأجرامُ تُعرَفُ **بالمصادرِ الراديويةِ شبهِ النجمية quasi-stellar radio sources**، وهو مصطَلَحٌ تمَّ اختصارُهُ فيما بعدُ إلى كلمة **الكوازارات quasars**، ولكنها تُعرَفُ الآنَ أيضاً باسمِ **الأجرامِ شبهِ النجمية quasi-stellar objects**، للسببِ التالي.

رغمَ أنَّ علمَ الفلكِ الراديويِّ قادَ إلىٰ اكتشافِ الكوازاراتِ أولاً، فسَرعانَ ما صارَ مِن الواضحِ أنَّ الكوازاراتِ ليست كلُّها مصادرَ راديويةً، وتمَّ اكتشافُ عددٍ مِن الأجسامِ المشابهةِ غيرِ ذات الإشعاعِ الراديويِّ «الصامتةِ راديوياً»، ولكنْ المُشابهةِ في أوجُهِها الأخرىٰ للكوازارات الأولىٰ مِثْلَ $3C_{273}$ و $3C_{248}$. ومِن بينِ أكثرِ مِن سبعةِ آلافِ كوازارٍ عُرِفَ حتىٰ الآنَ، فإنَّ صفةَ الانبعاثِ الراديويِّ لا توجدُ إلاّ في نسبةٍ يسيرةٍ مِن الكوازارات.

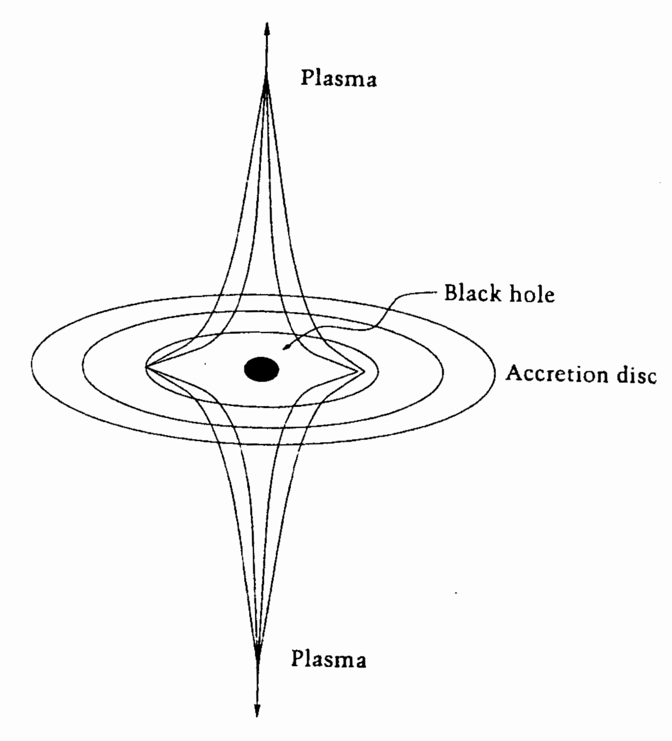
ولكنَّ الدراساتِ التي أُجريَتْ علىٰ الكوازاراتِ أظهَرَتْ بأنها باعثةٌ قويةٌ أيضاً للأشعةِ السينية. وتوحي الصورةُ العامةُ للكوازاراتِ بأنّ انبعاثَ أشعةِ إكس يجيءُ مِن المنطقةِ الداخليةِ الأكثرِ تَضاماً، وأنّ الانبعاثَ البصريَّ يجيءُ مِن المنطقةِ الوسطىٰ، بينما تأتي الانبعاثاتُ الراديويةُ، إن وُجِدَتْ، مِن منطقةٍ خارجيةٍ متمدّدة. وهكذا فلقد استُنتِجَ بأنَّ مصدرَ الطاقةِ الرئيسيَّ يقعُ في مركزِها، وهو منطقةٌ متضامّةٌ جداً، وهي يُمكِنُ أن تكونَ **ثَقْباً أسودَ فائقَ الكتلة supermassive black hole** تكوّنَ بفعلِ الانهيارِ (الانكماش) الجاذبيّ.

وليست هذه النتيجةُ بالجديدة، فقد خرجَ فاوْلَر وهويْل، عامَ ١٩٦٣، بفكرةٍ تقولُ إنَّ الانكماشَ الجاذبيَّ للجسم فائقِ الكتلةِ يؤدي إلىٰ تكوينِ مصدرٍ راديويٍّ قويّ. واقترحَ فيليب موريسون وألفونسو كاڤالير، في أواخرِ ستّيناتِ القرنِ العشرين، فكرةَ الدَّوّام (الدائرِ بسرعةٍ) spinar، وهو جِرمٌ فائقُ الكتلةِ، دوّارٌ حول محورِه (مثلَ النجم النيوترونيِّ، ولكنْ أكبرَ منه بمائةِ مليونِ مرّة!)، وتتحولُ طاقةُ جاذبيتِه إلىٰ طاقةٍ دَوَرانيةٍ ومغناطيسية، ومِن ثَمَّ إلىٰ إشعاع.

وأنْ **يُمكِنَ** للجاذبيةِ أن تَمُدَّ الطاقةَ المطلوبةَ لَهُوَ أمرٌ معروف، فلقد كانت المعضلةُ، بالنسبة إلى العلماءِ، هي في وضعِ نَصٍّ معقولٍ يُمكنُ بحسبِهِ أن تُحَوَّلَ طاقةُ الجاذبيةِ إلىٰ إشعاعٍ كهرومغناطيسيٍّ بطريقةٍ فعّالة.

واقترح مارتن ريز وروجر بلاند فورد، عامَ ١٩٧٤، شكلاً آخَرَ لهذهِ العملية، من طريقِ إضافات تراكميةٍ خارجيةٍ إلىٰ ثَقْبٍ أسودَ دوّارٍ حولَ نفسِه وفائقِ الكتلة. وتدلُّ التقديراتُ المبنيّةُ علىٰ المُعْطَياتِ الملاحَظةِ علىٰ الإشعاع، علىٰ أنَّ كتلةَ الثقبِ الأسودِ تبلغُ نحواً مِن **بليونِ كتلةٍ شمسية**. ويُقال بأنّ كفايةَ تحويلِ الطاقةِ مِن الجاذبيةِ إلىٰ الأشعةِ الكهرومغناطيسية قد تصلُ إلىٰ ٢٠٪ (قارِنْ ذلك بكفايةِ تحويلِ الطاقةِ، في مرحلةِ احتراقِ الهايدروجين، في النجمِ ذي التتابعِ الرئيسيِّ main sequence star، والتي تبلغُ ٠,٧ بالمائة وحَسْب). ولكنْ مِن المشكوكِ فيه أن يمكنَ الحصولُ علىٰ كفايةٍ عاليةٍ كهذهِ فعلاً.

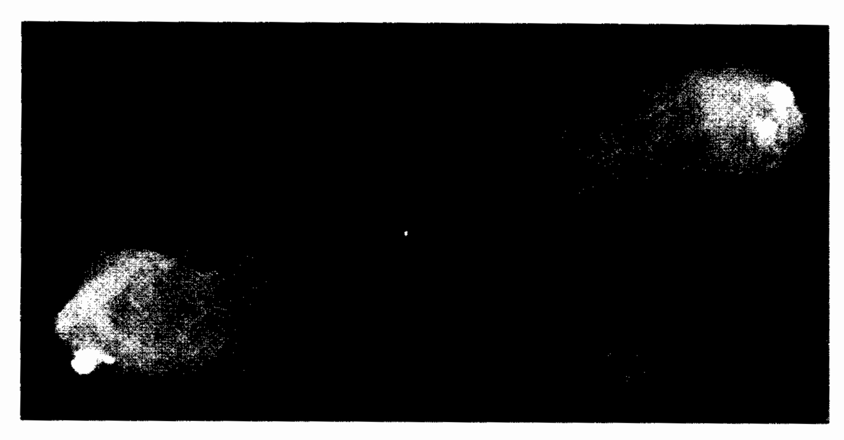
وتبقىٰ المعضِلةُ قائمةً في كيفيةِ الوصولِ إلىٰ التراصُفِ المضبوطِ والبِنيةِ المزدوجةِ اللّذيْنِ نراهُما في الشكل ٥,٢٧. ولقد اقترحَ ريس وبلاند فورد، في أواسطِ سبعيناتِ القرنِ التاسع عشر، أنموذجاً لِـ «العادِمِ المزدوج» Twin exhaust، والذي يظهرُ في الشكل ٥,٢٩. ويتمُّ في هذا الأُنموذجِ بَخُّ البلازما Plasma، مِن القرصِ المسطَّحِ، في الاتجاهاتِ الأقلِّ مقاومة. وبالنسبةِ إلى منظومةٍ دوّارةٍ حول نفسِها، فإنَّ هذه الاتجاهاتِ تقعُ علىٰ طولِ محورِ الدوران. ويكونُ شكلُ الجَريانِ للمِنْفَثَيْنِ، في الشكل ٥,٢٩، كالذي للمكائنِ النفاثةِ، والتي تُدعىٰ في علم حركةِ الهواءِ aerodynamics، بِفُوَّهةِ المقذوفاتِ. يتمُّ بَخُّ البلازما في هذينِ الاتجاهيْنِ المتعاكسيْنِ، وتسيرُ البلازما حتىٰ تُواجهَ مقاومةً مِن الوسطِ البَيْنَجْمِيّ، والذي يحدُّ مِن المسافةِ التي يمكنُ أن تسيرَها، ومِن ثَمَّ مِن حجم المصدرِ الراديويِّ المزدوج. وتُفَسَّرُ الفصوصُ الباعثةُ للأشعةِ علىٰ أنها المناطقُ التي يوجدُ فيها حقلٌ مغناطيسيٌّ، مسبِّباً انبعاثَ الإشعاعِ مِن قِبَلِ الجسيماتِ المشحونةِ



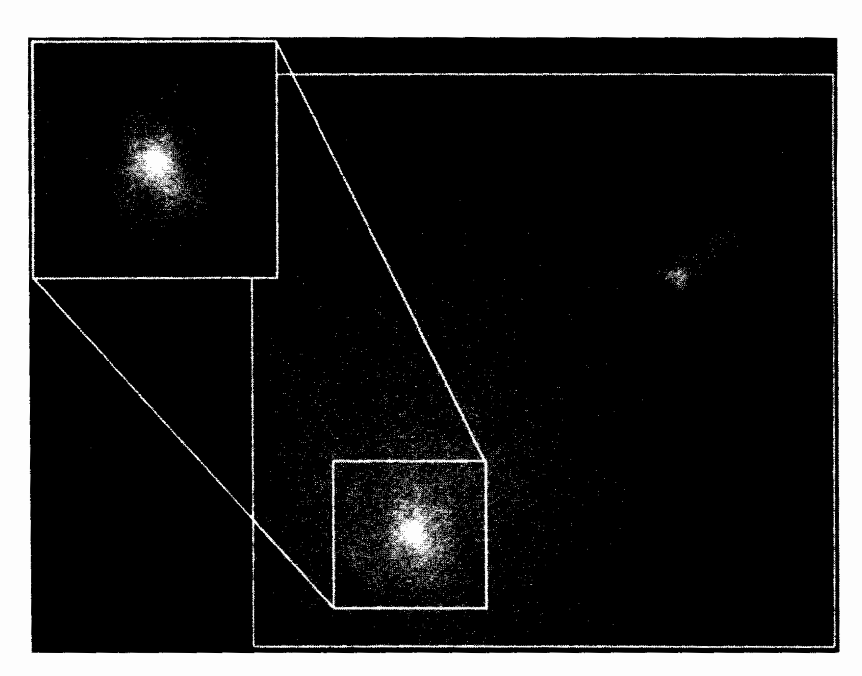
الشكل ٥,٢٩: نموذجُ العادِمِ المزدَوجِ، حيثُ يتمُّ بَخُّ البلازما Plasma إلىٰ الخارجِ، علىٰ طول فُوَّهتيْنِ مرصوفتيْنِ علىٰ محورِ الدوران.

المتحركةِ عَبْرَها. وتُرينا صورُ المصادرِ الراديويةِ، المأخوذةُ بالمَراقِبِ الحديثةِ، والمعالَجَةُ بالحاسبِ، هذه المَنافِثَ، أو التياراتِ، فعلاً.

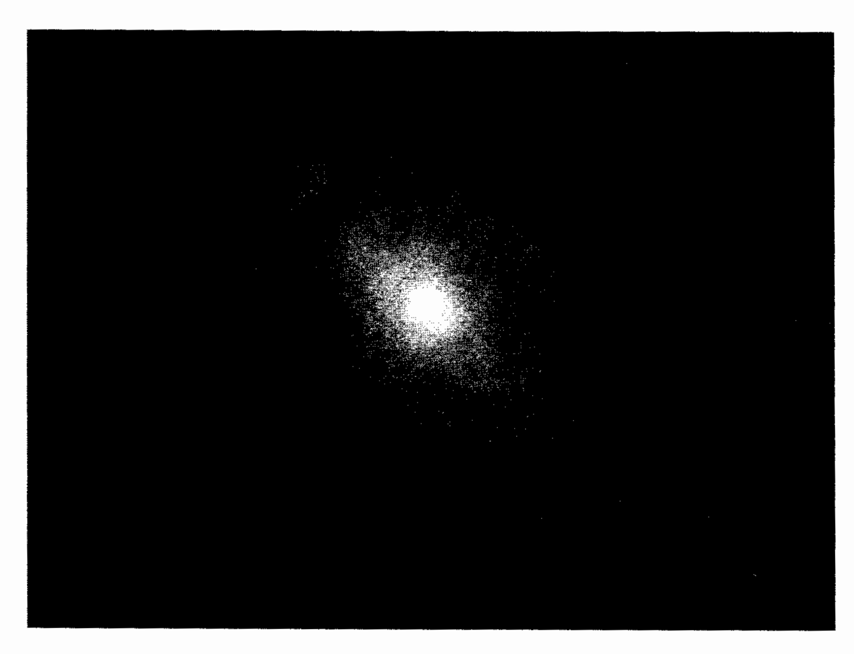
ويعتقدُ الكثيرُ مِن علماءِ الفيزياءِ الفلكيةِ بأنَّ الكوازاراتِ ترتبطُ بالمناطقِ النوويةِ المركزيةِ للمجرّاتِ، في عمليةٍ تطوريّة. وكمثالٍ علىٰ **المجرّةِ الناشطةِ active galaxy**، فإننا نرىٰ في الشكل ٥,٣١، نواةَ المجرّةِ المعروفةِ باسم M_{87}، والتي هي أسطعُ بكثيرٍ مِن أجزائها الخارجية. ويُرينا الشكلُ أيضاً مِنْفَثاً خارجاً منها. وهناك أنواعٌ أخرىٰ من المجراتِ تُعْرَفُ بمجراتِ سيفَرْت Syfert galaxies (انظرْ مثلاً الشكل ٥,٣٢)، حيثُ يكونُ التضادُّ بين النواةِ الساطعةِ ومحيطِها الباهتِ أكبرَ مِمَّا هو عليه الحالُ في مجرّةِ M_{87}. وقد تكونُ الكوازاراتُ خطوةً أخرىٰ في هذا التتابعِ، حيثُ إنها لو كانت تقعُ علىٰ مسافاتٍ بعيدةٍ فإننا لن نرىٰ منها سوىٰ نواتِها المركزيةِ الساطعة، ولا شيءَ مِن مُحيطِها الأبهتِ منها (لو كان له وجودٌ فعلاً).



الشكل ٥,٣٠ : صورةٌ راديويةٌ التقطها المِرقابُ المعروفُ باسم النظامِ فائقِ الكِبَرِ Very Large Array ، في نيومكسيكو، للمصدرِ الراديويِّ المعروفِ بكوكبةِ الدجاجة، وتظهرُ بِنيةُ الفصّيْنِ المزدوجيْنِ والتياراتِ الضيقةِ والباهتةِ مِن مركزيِّ الفصيْن.



الشكل ٥,٣١ : مجرّةُ M87، مع التركيزِ على النواةِ الناشطةِ، في يسارِ الصورة. أمّا اللوحُ الأيمنُ فيُظهِرُ المنطقةَ الأكبرَ التي تحتوي على مِنفَثٍ، أو تيّارٍ، خارجَ مِن النواةِ (صورةٌ التقطها مِرقابُ هابل الفضائيُّ، ناسا).



الشكل ٥,٣٢ : مجرّةُ سيفَرْت NGC 1068. ذاتُ النواةِ الناشطةِ الساطعة.

خاتمة

هكذا انتهينا مِن بحثِ أعجوبتِنا الخامسة، والتي تنبئُنا بالدورِ البارزِ الذي تلعبُه ظاهرةُ الجاذبيةِ علىٰ المستوىٰ الكونيّ. أمّا علىٰ مستوىٰ الذرّة، فإنَّ الجاذبيةَ يشحُبُ دَوْرُها إلىٰ درجةِ انعدامِ أهميتها، وهو أمرٌ قد انتهىٰ بعلماءِ فيزياءِ الذرّةِ والجُسيماتِ إلىٰ أنهم صاروا لا يُبالونَ بوجودِها، عندما يضَعونَ نظرياتِهم عن بِنْيَةِ الذرّة. وأما علىٰ المستوىٰ الكونيِّ، فإنَّ الجاذبيةَ تبرزُ لِذاتِها باعتبارها العاملَ المسيطرَ، وسواءٌ أكانَ ذلك علىٰ مستوىٰ النجومِ، أم المصادرِ الراديويةِ، أم الكوازارات. ذلك لأنَّ تجمُّعَ مادةٍ ما، في منطقةٍ تتعدّىٰ مقياساً حَرِجاً، سوف يؤدي إلىٰ حدوثِ انهيارِ (انكماشِ) جاذبيٍّ يأتي بأجرام شديدةِ الكثافة، مثل الثقوب السوداء. إنَّ فَوْراتِ الطاقةِ المرتفعةِ في الكونِ لَهِيَ شواهدُ تنبئُنا بأنّ الجاذبيةَ تُعلنُ عن وجودِها. وأمّا التحدّي، فإنَّه يكمُنُ في معرفةِ تفاصيلِ ذلك.

الأعجوبة (٦)

أُخدوعاتٌ في الفضاء

هل تعني الرؤيةُ التصديقَ؟

لقد نشأ عِلْمُ الفَلَكِ مِن خلالِ مشاهداتِنا للكون، ولقد كان في حركةِ الكواكبِ السَّيارةِ، وشروقِ الشمسِ، وتلألؤِ النجومِ، والمستسعِراتِ العُظمىٰ supernovae المثيرةِ، والنجومِ النابضةِ التي تعملُ عملَ الساعاتِ، ومصادرِ الطاقة القويةِ الموجودةِ في الكوازاراتِ، مَصْدَرُ عملٍ للعالِم الفلكيِّ، وتَحَدٍّ لعالِم الفيزياءِ الفلكيةِ، إذ يتوجّبُ علىٰ الأخيرِ أن يقومَ بتفسيرِ ما قد شاهَدَهُ الأوّلُ. وقانونُ الجاذبيةِ، وظاهرةُ الاندماجِ الحراريِّ النوويِّ، وآثارُ القوّةِ الكهرومغناطيسية في الطاقات العاليةِ، وسلوكُ الثقوبِ السوداء، إلخ، إنَّما كلُّها نواتجُ لاستجاباتِ عالِم الفيزياءِ الفلكيةِ لمثلِ هذهِ التحديات. ومِن عَباءةِ هذه النظرياتِ تخرجُ توقعاتٌ جديدةٌ بما يتوجبُ علىٰ الفلكيِّ أن يبحثَ عنه في الكون.

وبينما تستمرُ هذه الدورةُ التي لا تنتهي مِن الملاحَظةِ ← النظريةِ ← الملاحظةِ . . . ، فلننظرْ في وجهٍ آخَرَ قد دخلَ الميدانَ، وهو وجهٌ يمكنُ أن يؤدِّيَ إلىٰ تعقيدِ ما كانَ يمكنُ أن يكونَ افتراضاً في علمِ الفَلَكِ هو غايةٌ في البساطة.

والافتراضُ هو: «الرؤيةُ هي التصديقُ seeing is believing».

أي أنّ الفلكيينَ يتوجبُ عليهم أن يُصدِّقوا كلَّ ما تُظهرُهُ مَراقبُهم، إذ لا يمكنُ أن يكونَ هناكَ أيُّ شيءٍ «غَلَطاً» فيما يَرَوْنَهُ علىٰ الألواحِ التصويرية أو صُوَرِ الحاسب.

ولكنَّ الشَّكَّ قد تَطَرَّقَ إلىٰ هذا الافتراضِ البسيطِ، منذُ أوائلِ سبعيناتِ القرنِ العشرين، إذْ لا بدَّ مِن **الحَذَرِ** عند تفسيرِ الصُّوَرِ الفلكية. ولسوف نرىٰ في هذا الفصلِ أمثلةً مِن «الأوهام»، أو الأُخدوعات، التي تُحذِّرُ العالِمَ الفلكيَّ مِن أنه قد يكونُ هناك فوقَ ما قد يبدو للعِيان.

ولقد أشَرْنا، بالفعل، إلىٰ مثالٍ علىٰ ذلك في الفصلِ الثالث. فعندما ننظرُ إلىٰ نجم، أو مجرّةٍ ما، في صورةٍ فلكيةٍ، فإننا لا نراها كما هي عليه **الآنَ**، بل إننا نراها **كما كانت** عليه عندما غادَرَها الضوءُ الداخلُ إلىٰ آلَتِنا التصويريةِ اليومَ.

ألْقِ نظرةً علىٰ صورةِ المجرّةِ العظيمةِ في «المرأةِ المُسَلْسَلَةِ»، أو الأندروميدا Andromeda، في الشكل ٦,١. إنَّ الصورةَ يُفترَضُ أنَّها تنبئُنا عمّا يبدو عليه هذا الجِرْمُ. ولكن، **هل إنَّ الصورةَ في الشكل ٦,١ تفعلُ ذلك؟**

تقعُ مجرّةُ المرأةِ المسلسلةِ «الأندروميدا» علىٰ بُعْدِ مليونيّ سنةٍ ضوئيةٍ عنّا تقريباً. وهكذا فإننا نرىٰ هذه المجرَّةَ كما كانت عليه قبلَ مليونيّ عام، وليس كما هي عليهِ اليوم. ولكنْ حتىٰ قولُنا هذا ليس صحيحاً تماماً، لأنَّ عَرْضَ مجرَّةِ المرأةِ المسلسلةِ يبلغُ نحواً من ١٠٠٠٠٠ سنةٍ ضوئية. ولذا فإنّ نهايتيْها ليستا علىٰ البُعدِ ذاتِه عنّا. وحَسَبَ وضع هذهِ المجرّةِ بالنسبةِ إلى خطِّ نظرِنا، فإنّ أجزاءً منها يمكنُ أن تكونَ، وبكلٍّ بساطةٍ، أبعدَ بـ ٥٠٠٠٠ سنةٍ ضوئيةٍ عنا مِن بُعْدِ أجزائِها الأخرىٰ. وهكذا فإننا لا نراهما في الحِقبةِ الزمنيةِ التي هما عليها ذاتِها، إذ إنَّ الجزءَ الأقربَ منها يُرىٰ متأخراً بـ ٥٠٥٠٠ عام عن الجزءِ الأبعدِ منها. ولذا فإنَّ ما نراهُ إنما هو مزيجٌ مِن أجزاءَ مختلفةٍ مِن المجرّةِ، مرئيّةً



الشكل ٦,١: سديمُ المرأةِ المسَلْسَلَةِ «الأندروميدا» Andromeda Nebula. إنَّ نهايتيّ المجرةِ تقعانِ علىٰ مسافتيْنِ مختلفتيْنِ عنا، ولذا فإنها تُرىٰ في أزمانٍ مختلفةٍ منها.

في أحقابٍ مختلفة (ولنتذكّرْ صورةَ الأمِّ وابنتِها في الفصلِ الثالث).

الحركةُ فوقُ الضوئية Superluminal motion

لقد رأينا، في الفصلِ الخامسِ، كيف أنَّ أفكارَ النسبيةِ الخاصةِ تعني وجودَ حدٍّ أساسيٍّ علىٰ سرعةِ أيِّ جسم ماديّ، إذ لا جسمَ كهذا يمكنُه أن يصلَ إلىٰ سرعةِ الضوء، بَلْهَ أن يتعدّاها. وعلىٰ أيةِ حالٍ، فلقد بدأتِ المشاهَداتُ المفصّلةُ للبنىٰ الداخليةِ للكوازاراتِ في الكشفِ عن وجودِ حركةٍ أسرعَ مِن حركةِ الضوء (حركةٍ فوقَ ضوئية)، في بعضِ الحالات. ولسوف نتناولُ هذا المِثالَ في حالتِنا التاليةِ مِن الأُخدوعاتِ الكونية.

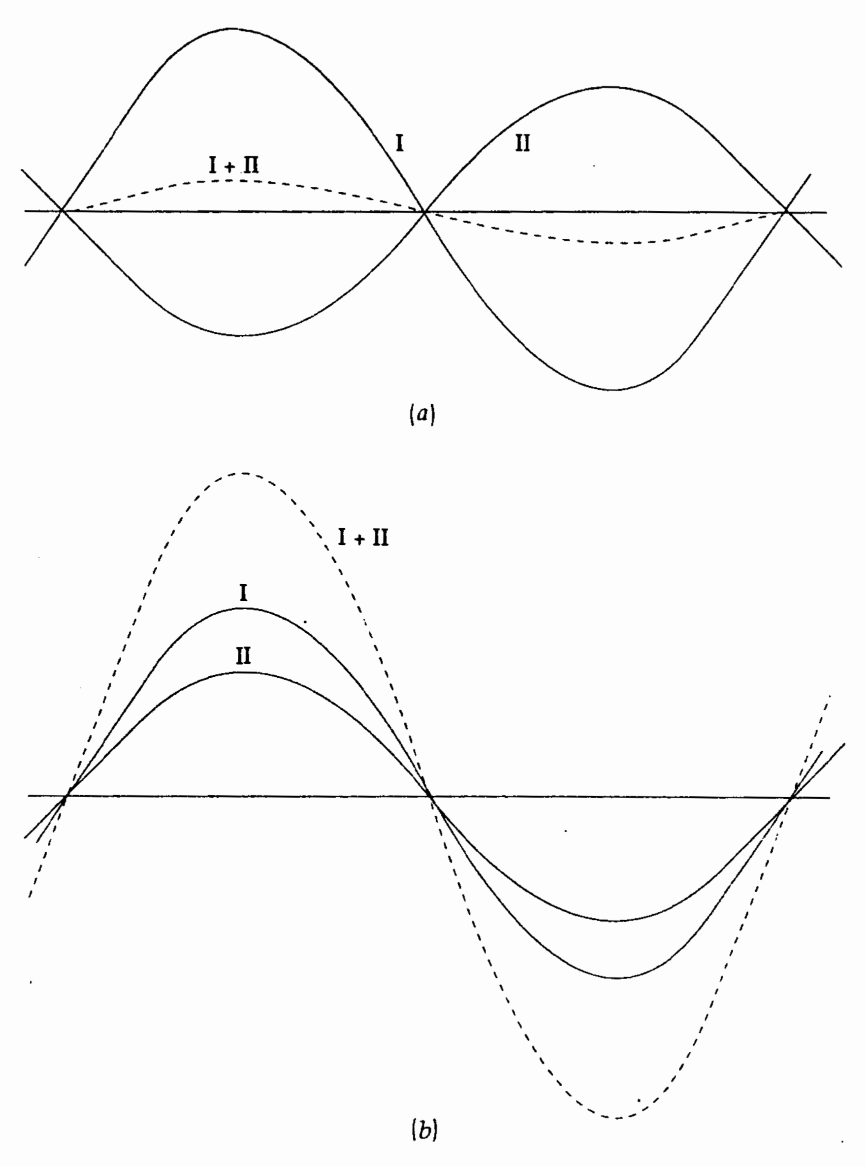
قياسُ تداخلِ الموجاتِ[1] من طريقِ خطوطِ القاعدةِ بالغةِ الطول
Very - long - baseline interferometry (VLBI)

لقد قامت أقطارٌ كثيرة، وفي قارّاتٍ مختلفة، بإنشاءِ المَراقبِ (التلسكوبات) الراديوية، مع حُلولِ ستيناتِ القرنِ العشرين. ولقد كانت هذه، في أولِ الأمر، أدواتٍ منفردةً تمَّ تصميمُها لبرامجَ منفصلةٍ. ولكنَّ جمهرةَ علماءِ الفلكِ الراديويِّ شعرَتْ بأنَّ مِن الممكنِ الحصولَ علىٰ ما هو أكثرُ مِن ذلك بكثير، مِن خلالِ تجميعِ جهودها. وكان قياسُ التداخلِ من طريقِ الخطوطِ القاعديةِ بالغةِ الطولِ أحَدَ البرامجِ الَتي تمخّضتْ عن هذا العملِ المشترك.

إنّ «المِدخالَ»، أي مقياس التداخل interferometer، هو أداةٌ تستفيدُ مِن ظاهرةِ **تداخلِ interference** الموجات. وللموجةِ النموذجيةِ ذرواتٌ ومنخفضاتٌ، فإذا كان المِرْقابُ يستلمُ طاقميْنِ مِن الموجاتِ مِن المصدرِ ذاته، وسارتْ إحداهُما مسافةً أطولَ مِن الأخرىٰ بقليل، بسبب اختلافِ طريقها الذي سَلَكَتْهُ، فإنَّ ذُرواتِها ومنخفضاتِها سوف لن تتناغم. وحَسَبَ هذا الفرقِ في المسافاتِ، أو ما يُعرَفُ **باختلافِ المسار path difference**، فإنَّ ذرواتِ إحداهما قد تسقطُ علىٰ منخفضاتِ الأخرىٰ. وعندئذٍ تكونُ الموجةُ الناتجةُ، والتي يمثّلُها الخطُّ المتقطعُ I +II في الشكل ٦,٢ (أ)، صغيرةً جداً، بسببِ إلغاءِ الذرواتِ والمنخفضاتِ هذا. ولو زِيدَ اختلافُ المسارِ بمقدارِ نصفِ طولِ الموجةِ، فإنَّ ذرواتِ الواحدةِ ستسقطُ علىٰ ذرواتِ الأخرىٰ. وهكذا، وكما يظهرُ في الشكل ٦,٢ (ب)، فإنَّ محصّلةَ (صافي إزاحةِ موجتيْنِ متساويتيْنِ تقريباً) سوف تتغيّرُ مِن

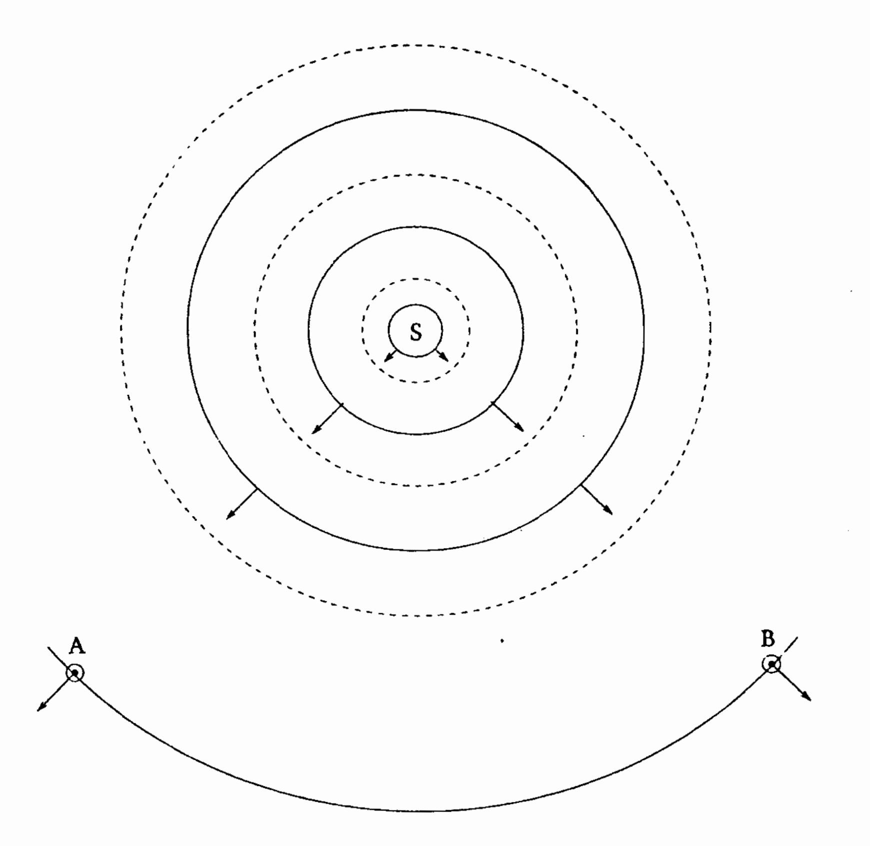
---

(١) قياسُ التداخُلِ هو استخدامُ ظواهرِ التداخلِ الضوئيِّ لتحديدِ طولِ الموجةِ ومُعامِلِ الانكسار. د.س



الشكل ٦,٢ : نرىٰ في (أ) التداخلَ المُدَمِّرَ لموجتيْنِ اثنتيْنِ، والذي تنتجُ عنه إزاحةٌ صغيرةٌ يبيّنُها الخطُّ المتقطع. أمّا إذا كانت الموجتانِ متساويتيْنِ تماماً ومتعاكستيْنِ، فإنَّ المحصّلةَ تكونُ صفراً. وفي «ب» تتطابقُ ذرواتُ الموجتيْنِ فتكونُ المحصّلةُ كبيرةً، وتبلغُ ضِعفَ الإزاحاتِ المفردةِ تقريباً.

الصِّفرِ تقريباً (ذروةٌ فوق منخفَضٍ) إلى ما يعادلُ الضِّعفَ تقريباً (ذروةٌ على ذروةٍ) مِن الإزاحاتِ المنفصلة. ويتَّضِحُ مِن ذلكَ أنَّ تِقنيةَ التداخلِ مفيدةٌ جداً في سَبْرِ أغوارِ التفاصيلِ التركيبيةِ للمصدرِ، لأنها تكشفُ عن اختلافِ المساراتِ التي تتبعُها الموجات.



الشكل ٦,٣ : تخرجُ الأشعةُ الكرويةُ، مِن المصدرِ S، متجهةً إلىٰ الخارج، علىٰ طولِ كُراتٍ متمددة. إنَّ الكراتِ المتبادلةَ مِن الخطوطِ المستمرةِ والمتقطعةِ تدلُّ، علىٰ التوالي، علىٰ ذرواتِ ومنخفضاتِ الموجات. وقد يكشفُ المِرقابانِ البعيدانِ، في A و B، عن جبهةِ الموجةِ ذاتها.

ويُرينا الشكلُ ٦,٣ كيف أنّ خطَّ الأساسِ الطويلِ، لاثنيْنِ مِن المَراقبِ مربوطيْنِ واحدهما بالآخرِ، يمكنُ أن يزوِّدَنا بصورةٍ أوضحَ للمصدر. ولدينا في الشكلِ مِرْقابانِ اثنانِ، هما A و B، يستلِمان موجاتٍ مِن المصدرِ ذاتِه S. وتَظهرُ الذرواتُ والمنخفضاتُ الكرويةُ علىٰ شكلِ دوائرَ متبادَلةٍ مستمرّةٍ ومتقطعةٍ تخرجُ مِن S. وإذا كان باستطاعةِ المِرقابيْنِ A و B أن يسجّلا وقتَ وصولِ الجبهةِ الموجية، فإنَّ بإمكانهما أن يحدّدا موقعَ المصدر S، بدِقّةٍ أكبر. وكلّما كان خطُّ الأساسِ AB أكثرَ طولاً كلّما زادت الدِقّة.

ولكننا نتوقعُ، اعتيادياً، أنّ A و B يتّصلانِ بوساطةِ وصْلاتٍ، بحيثُ يمكنُ مقارنةُ مشاهداتِهما. وإذا كان A و B بعيديْنِ جدّاً عن بعضهما، فإنَّ مِثلَ هذا الاتصال قد لا يكونُ ممكناً. وعلىٰ الرغمِ مِن ذلك، وبسبب توفّرِ ساعاتٍ ذرّيةٍ دقيقةٍ للغاية، فإنَّ مِن

الممكنِ الاستغناءَ عن التوصيلة. ويمكنُ لكلٍّ مِن المراقبيْنِ في كلٍّ مِن A و B، أن يحصلا علىٰ توقيتاتٍ مضبوطةٍ للذرواتِ والمنخفضاتِ التي تمرُّ بهما، ويمكنُهما بذلك أن يحصلا علىٰ النتيجةِ ذاتِها. ولقد جعلَ هذا المظهرُ فكرةَ مقياسِ التداخلِ القاعديِّ الطويلِ جداً فكرةً ممكنةَ التحقيق، حتىٰ لو كانت آلافُ الكيلومتراتِ تفصلُ ما بين A و B. وهذا يمكِّنُنا بدورِه مِن أن نحصلَ علىٰ استبانةٍ resolution عاليةٍ جداً للمصدرِ الكوازاريّ، أي حتىٰ لو كان مُكَوِّناهُ مفصوليْنِ الواحد عن الآخر بالنسبةِ إلىٰ الراصدِ الأرضيِّ بدرجةٍ أقلّ مِن **واحدٍ مِن ألفِ جزءٍ مِن ثانيةٍ قوسية second of arc**، فإنَّ مِن الممكنِ رؤيتَهما بوضوح.

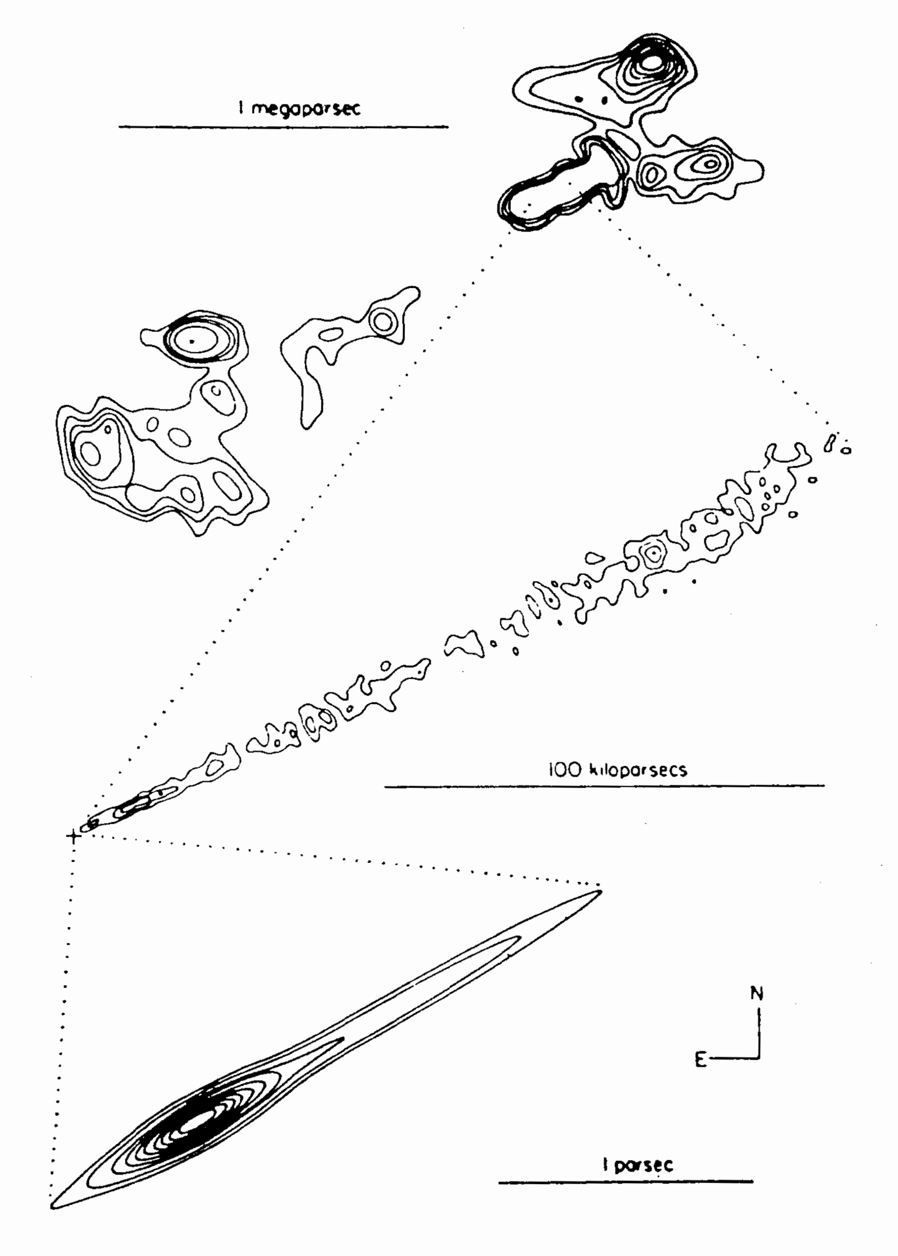
وحتىٰ نعرفَ مدىٰ هذهِ الاستبانةِ التي يُمكنُ رؤيتُها، يمكنُ تشبيهُ الأمرِ برؤيةِ نهايتيِّ قلمِ الحبرِ علىٰ شكلِ نقطتيْنِ منفصلتيْنِ، مِن على مسافةِ ٢٠٠٠ كيلومترٍ عنهما.

ولقد أصبح بإمكانِ العلماءِ، مِن خلالِ درجة الاستبانةِ العاليةِ الممكنِ الحصولُ عليها بوساطةِ تقنية VLBI آنفةِ الذكر، أن يطبّقوها علىٰ تلك الكوازاراتِ التي هي باعثةٌ قويةٌ للموجاتِ الراديوية (ومِن بينِ عدَدِ الكوازاراتِ كلِّها، فإنَّ عشرةً بالمائة منها فقط هي تلك التي تبعثُ بقوةٍ موجاتٍ ذاتِ أطوالٍ موجيةٍ راديوية). لقد كشفَتْ هذه التقنيةُ عن تفاصيلِ البنىٰ الموجودةِ في الكوازاراتِ، علىٰ مقياسٍ مِن سنينَ ضوئيةٍ قليلة.

فلنتوقفْ هنا قليلاً لنرىٰ كيف زوّدَتِ التقنياتُ المختلفةُ العالِمَ الفلكيَّ باستبانةٍ متزايدةٍ للتفاصيل.

ويُظهِرُ الشكلُ ٦,٤ سلسلةً مِن خرائط لمصدرٍ راديويٍّ مُرافقٍ للمجرة NGC_{6251}.
ويبيِّنُ لنا الرقمُ العلويُّ حجمَ المصدرِ الراديويِّ علىٰ أضخمِ مقياسٍ معروف، وهو **مليونُ سنةٍ ضوئية**. وتكشِفُ الخريطةُ الأكثرُ استبانةً، في الوسطِ، عن وجودِ دفقٍ، أو تيّارٍ، يبلغُ طولُه حوالىٰ ٥٠٠٠٠٠ سنةٍ ضوئيةٍ، ولكنْ مع بِنيةٍ يمكنُ ملاحظتُها علىٰ مقياسٍ من ١٠٠٠٠ سنةٍ ضوئية. ويَزيدُ وضوحُ هذه التفاصيلِ بوساطة تقنية VLBI، في الأسفلِ، ببِنيةٍ يمكنُ تبيّنها علىٰ مقياسٍ مِن سنةٍ ضوئيةٍ واحدة (يبلغُ طولُ البِنية الكاملةِ، في الأسفلِ، أقلَّ مِن ١٠ سنينَ ضوئية!).

ويمكنُ مقارنةُ هذهِ السلسلةِ مِن الخرائطِ بخارطةٍ لبلدٍ، ثم لمدينةٍ، ثم لدارٍ. إنّ كلَّ خريطةٍ تُرينا استبانةً أكبرَ مِن سابقتِها.



الشكل ٦,٤ : مُسَلْسَلٌ للاستبانة resolution، مبيّناً بِنيةَ المصدرِ الراديويِّ المُرافقِ للمجرةِ المعروفةِ برمزِ $NGC0_{6251}$، في أحجامٍ مختلفة. إنَّ الفرسخَ النجمِيَّ (parsec) الواحدَ يساوي ثلاثَ سنواتٍ ضوئيةٍ تقريباً، عن بحثٍ لريدهيد، وكوهين، وبلاندفورد، عن مجلة نيتشر ٢٧٢، ١٣١، ١٩٧٨.

حركةُ مكوّناتِ تداخُلِ موجاتِ الكوازار

لقد صارَ في إمكان الفلكيينَ، منذُ أوائلِ سبعيناتِ القرنِ العشرين، أن يقوموا بدراسةِ خرائطَ ذاتِ استبانةٍ عاليةٍ، أُخِذَتْ لكوازاراتٍ في أوقاتٍ مختلفة. ويُرينا الشكلُ ٦,٥ خريطةً للكوازارِ $3C_{345}$، وقد أُخذَتْ عامَ ١٩٧٤. ويتمُّ التقاطُ مثلِ هذهِ الصُّوَرِ في كلِّ عامٍ تقريباً، وهي تبدو متشابهةً في بِنيتها.

وتتميزُ هذه الخرائطُ بأنها خرائطُ محيطيةٌ[1] contour maps، وهي ذاتُ خطوطٍ ثابتةِ الشدّة. ومِن خلالِ مقارنتِها بالخرائطِ المحيطيةِ في الأطلسِ الجغرافيِّ، حيثُ يمكنُ التعرّفُ على ارتفاعاتِ الجبال المختلفةِ مِن خلالِ خطوطِها المحيطية، فإننا نرى أنَّ الخارطةَ التي تظهرُ في الشكل ٦,٥ تبيِّنُ لنا «ذُروتيْنِ» اثنتيْنِ، ولْنَقُلْ إنهما A و B، ذواتَيْ شدّةٍ مرتفعةٍ، في كلِّ خارطة. وكذلك فإذا ما نظرْنا إلى القِمّتيْنِ ذَواتيْهِما في أمثالِ هذه الخرائطِ كلِّها، حسبَ الترتيبِ الزمنيِّ، فإننا نستنتجُ بأنّ A وB تبتعدانِ الواحدة عن الأخرى. ولكن، كم هي هذه السرعةُ النسبية؟

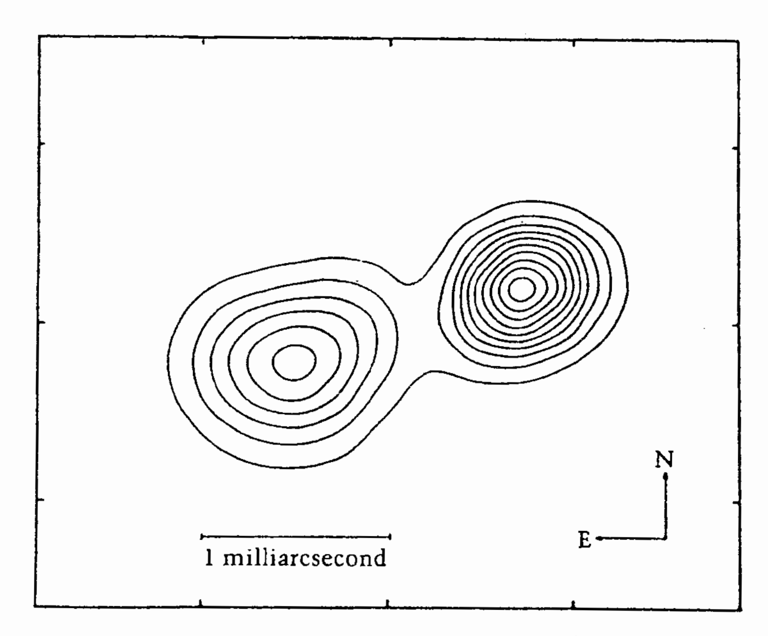
فلْننظرْ أوّلاً في كيفيةِ قياسِ هذه السرعة. إننا نحتاجُ، لأجلِ ذلك، إلى معرفةِ طولِ AB في كلِّ واحدةٍ مِن المشاهَدات. وما يمكنُ للفلكيِّ أن يقيسَه مباشرةً هو الزاويةُ التي تُقابلُ القوسَ AB، للمُشاهدِ O. ويبيِّنُ الشكلُ ٦,٦ هذه المسألة.

ولديْنا هنا دائرةٌ مركزُها O، وتقعُ عليها كلٌّ مِن A و B. ويمكنُ قياسُ الزاويةِ AOB، فهي الزاويةُ التي تقعُ ما بينَ اتجاهيِّ A و B كما نراهُما مِن O. ولقياسِ طولِ القوسِ، فإننا نحتاجُ إلى معرفةِ طولِ نصفِ قطرِ الدائرة. فلنفرض أنّ نصفَ القطرِ هو R.

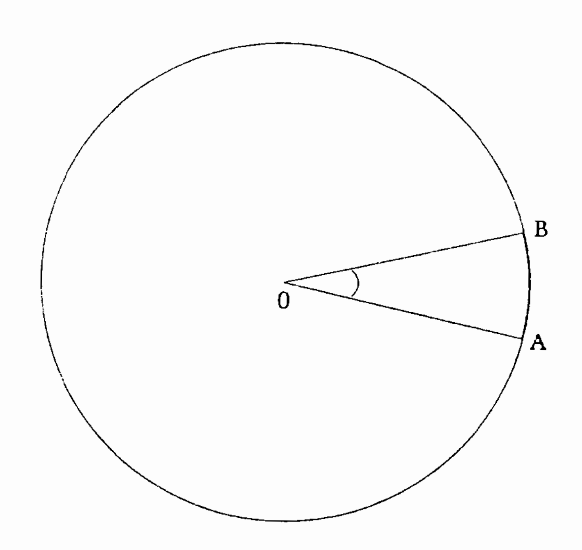
نحنُ نعلمُ بأنَّ محيطَ الدائرةِ يساوي طولَ القُطر × النسبةِ الثابتة، أي $2 \pi R$ (حيثُ أنَّ R هو نصفُ قطرِ الدائرة، و π هي النسبةُ الثابتة، وتساوي ٢٢/٧). إنَّ الزاويةَ الكاملةَ التي يصفُها محيطُ الدائرةِ الكاملُ حول O تبلغُ ٣٦٠°. ولو أخذْنا جزءاً مِن المحيطِ فقط، وليكنُ القوسَ AB، فستكونُ نسبةُ الزاويةِ المقابلةِ لِـ O مِن قِبَلِ هذا القوسِ إلى ٣٦٠°، كنسبةِ طولِ AB إلى $2 \pi R$. وهكذا، وباستعمالِ التناسبِ البسيط، فإنَّ AB تساوي ٢ نصف القطر × ٢٢/ ٧× الزاوية AOB/ ٣٦٠°.

---

(١) أي أنها ترسمُ مُحيطَ الشيء. د.س



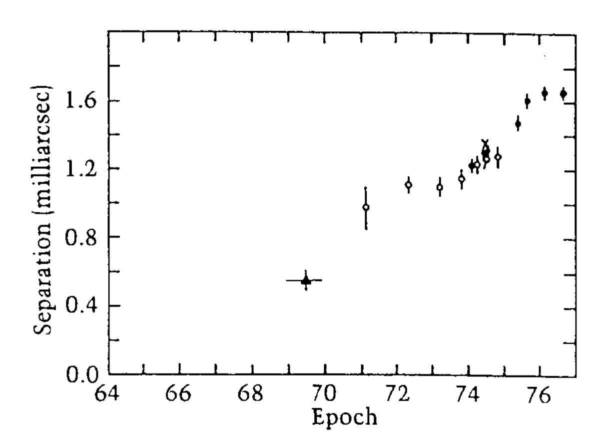
الشكل ٦,٥ : الخطوطُ المحيطيةُ لِسُطوعِ الكوازارِ المعروفِ بإشارةِ 3C345، مرئيةً بطولٍ موجيٍّ مِن ٢,٨ سم، في أواسطِ العام ١٩٧٤، وقد أسمَيْنا قِمَمَ شِدّةِ الإضاءةِ، في متنِ الكتابِ، A و B.



الشكل ٦,٦ : تعتمدُ النسبةُ بين طولِ القوس AB والزاويةِ AOB علىٰ نصفِ قطر الدائرة.

وهكذا، وبشرطِ معرفتنا لنصفِ قطرِ الكوازارِ (R)، يُمكنُنا أن نقدِّرَ طول AB. وأمّا نصفُ القطرِ (R)، فنحصلُ عليه مِن الإزاحةِ الحمراء (Z) للكوازار، ومِن قانونِ هابل لتمدّدِ الكون. ولهذه التفاصيل نُحيلُ القارئ هنا إلىٰ الفصلِ السابع. أمّا الآنَ، فإننا نفترضُ، وببساطةٍ، أنَّ إزاحةَ الكوازارِ الحمراءَ يمكنُ قياسُها مِن طيفه، وأنّ بُعد الكوازار عنا يتمُّ الحصولُ عليه من طريقِ ضربِ الإزاحةِ الحمراءِ بعددٍ ثابتٍ يَقرُبُ مِن ١٠ ملايين سنةٍ ضوئية. وهكذا ففي حالة الكوازارِ $_3C_{345}$، ولأنَّ إزاحَتَه الحمراءَ تبلغُ ٠,٥٩٥، فإنَّ بُعدَهُ عنّا يبلغُ ستّةَ بلايينِ سنةٍ ضوئيةٍ تقريباً. ويمكنُ للفلكيين، مِن خلالِ تطبيقِ هذه الطريقةِ، أن يقيسوا AB لكلٍّ مِن الخرائطِ المتتابعةِ لِـ $_3C_{345}$. ولقد وُجِدَ بأنَّ هذه المسافةَ تزيدُ في كلِّ عام. ونرىٰ في الشكل ٦,٧ رسماً بيانياً للمسافةِ AB، مقابِلَ الزمنِ مقيساً بالسنين.

ولقد حصلنا هاهنا علىٰ نتيجةٍ هي أعجبُ ما يكون، ولأوّلِ مرّة. **لقد وُجِدَ بأنَّ سرعة AB يزيدُ بمعدّلٍ يبلغ نحواً من ٣ ـ ٨ أضعافِ سرعةِ الصوت**. إنَّ مِن الواضح أنَّ هذه **الحركةَ فوقَ الضوئيةِ، أي التي هي أسرعُ مِن الضوء superluminal**، هي ضدّ نظَريةِ النسبيةِ الخاصة.



الشكل ٦,٧ : رسمٌ بيانيٌّ، بالتسلسلِ الزمنيّ، مُبيِّناً كيفية زيادةِ الزاوية ABO التي تعودُ إلىٰ الكوازار $_3C_{345}$، بينَ عاميْ ١٩٦٩ و١٩٧٧. وقد أُجريَتِ الحساباتُ بالأطوالِ الموجيةِ التالية: X= ٢سم، ● = ٢,٨سم، O = ٣,٨سم، ▲ = ٦سم (استناداً إلىٰ بحوثِ كيلرمان وشافر، المنشورة في محاضرِ مؤتمرٍ عن تطورِ ونشوءِ المجرات ومتضمَّناتِها الكونية، پاريس، ١٩٧٧).

ولم تكنْ حالةُ الكوازار $3C_{345}$ بالحالةِ المعزولة، فلقد كشَفَتْ دراساتُ تقنيةِ VLBI، لعددٍ مِن الكوازاراتِ الأخرىٰ، عن نتائج مُشابهة. وهكذا فإنَّ الفلكيينَ لا يمكنهم أن يصرفوا النظرَ عنها باعتبارها محضَ مصادفاتٍ أو أغلاطٍ في التجربة، إذ يتوجّبُ أن يقدّموا تفسيراً لها.

ثلاثةُ تفسيراتٍ للحركةِ فوقِ الضوئية

ثَمَّةَ، بالطبع، وسيلةٌ للحصولِ علىٰ تفسيرٍ ما، تُعلِنُ عن نفسها، فوراً. إننا نحصلُ علىٰ قيمةٍ عاليةٍ لسرعةِ انفصالِ AB، لأنَّ طولَ AB كبيرٌ جداً. وطولُ AB كبيرٌ جداً، لأنَّ نصفَ قطرِ الكوازار (R) بعيدٌ غايةَ البُعد عنّا. فلو كان نصفُ قطرِهِ أقصرَ بمائةِ مرّةٍ، مثلاً، فإنَّ سرعةَ انفصالِ A و B ستهبطُ بالدرجةِ ذاتِها، وهذا سوف يُزيلُ أيَّ تناقضٍ مع نظريةِ النسبيةِ الخاصة.

ولكنَّ ذلك لَهُوَ الخيارُ الضعيف، وهو ليس بالرائج لدىٰ الفلكيين، لأنه يعني أنَّ طريقةَ استخراج بُعدِ الكوازارِ، مِن إزاحتِهِ الحمراءِ، كان مغلوطاً. ولسوف نُشيرُ إلىٰ هذا الخلافِ الذي يحيطُ بأبعادِ الكوازاراتِ في خاتمةِ الكتاب. ولكنّنا نأخذُ هنا، وببساطةٍ، بالرأي الذي هو عليه أكثرُ جمهورِ الفلكيينَ، في أنّ أبعادَ الكوازاراتِ تتناسبُ فعلاً مع إزاحاتها الحمراء، حسَبَ قانون هابل. وبالاختصار، فإنَّ طريقتَنا في تقديرِ نصف قطر الكوازار (R) صحيحة. وهكذا فإنَّ ذلك يستبعدُ تلكَ الطريقةَ السهلةَ للتفسير.

أُنموذجُ شجرةِ عيد الميلاد

فلنتأمّلْ في شجرةٍ لعيدِ ميلادٍ تُغطِّيها مصابيحُ كهربائيةٌ صغيرة. ويمكنُ أن يكون ثمّةَ تتابعٌ لغلقِ وفتحِ مفتاحِ نورِ المصابيح مُرَكَّباً في أسلاكها، بحيثُ إنها تتبعُ ذلك التسلسلَ عند فتحِ الكهرباء. وبالنسبة إلىٰ شخصٍ ينظرُ إليها علىٰ مسافةٍ منها، يحدثُ وهمٌ بحدوثِ حركةٍ للأضواء. كما أنَّ مفاتيحَ النيونِ تُحدِثُ أيضاً وهماً بالحركة، في لوحاتِ الإعلانِ الضخمةِ في زوايا الطرُقات.

وبناءً علىٰ هذه الأمثلةِ، فلقد خرجت الفكرةُ التي تقولُ بأننا لا نرىٰ في هذه الكوازاراتِ حركةً فيزياويةً لمكوناتها، ولكننا نشهدُ بدلاً مِن ذلك مكوناتٍ **مختلفةً** تجري إضاءَتُها، وكما يُبيِّنُ لنا تتابعُ الإضاءةِ في الشكل ٦,٨.

ولو وجّهْنا حزمةً ضوئيةً ضيقةً مِن مصباحٍ كهربائيٍّ يدويٍّ علىٰ جدارٍ في غرفةٍ

مظلمة، لأمكنَ لنا أن نولِّدَ حركةً لبقعةِ الضوء عَبْرَ الحائط بتحريك الحزمة. ويمكنُ أن نجعلَ هذه الحركاتِ سريعةً بصورةٍ مُصطنَعَةٍ، وهي مِمّا لا يتناقضُ مع النسبيةِ الخاصة، لأنها لا تصِفُ حركاتِ الأجسامِ المادية.

وعلىٰ أيةِ حال، فإنَّ مثلَ هذه المحاولاتِ لفهم الحركاتِ فوقِ الضوئية، في الكوازاراتِ ذاتِ البِنيةِ الهندسيةِ المعقدة، صارت تبدو مُصطَنَعَةً أكثرَ وأكثر، مع تزايدِ معلوماتنا عن هذه المصادر.

أُنموذجُ التوجيه The beaming model

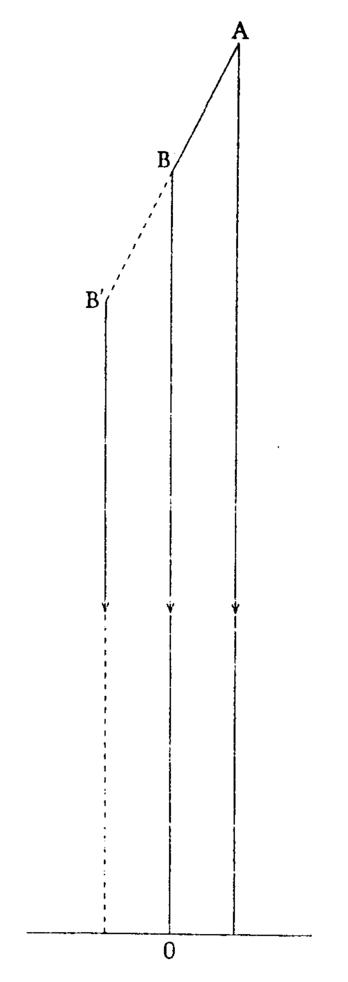
هذا أُنموذجٌ بُنِيَ علىٰ فكرةٍ سابقةٍ لمارتن ريز، مِن كامبريدج، ويحدثُ فيه توهُّمٌ لحركةٍ فوقِ ضوئيةٍ، كالآتي:

تخيّلْ، وكما في الشكل ٦,٩، مصدراً يتكوّنُ مِن مصدريْنِ مُشعَّيْنِ، وهما A و B. والمصدرُ A ثابتٌ بالنسبةِ إلى الراصدِ O، بينما أنَّ B يتحركُ نحو O، باتجاهٍ يكونُ فيه الخطُّ AB مُشيراً إلىٰ O، ومِن هنا جاءَ إطلاقُ اسم «التوجيهِ» علىٰ هذا الأنموذج. ولسوف يظهرُ في الشكل، وكما هو مرسومٌ، بأنَّ O يرىٰ A و B كليهما في الوقتِ ذاتِه، أي في لحظةِ الوقتِ ذاتها (moment of time).

ولكنَّ ذلك ليس صحيحاً إذا ما لاحظْنا بأنَّ بُعدَيْهما عن O مختلفان، إذ إنَّ A هو أبعدُ عن O مِن B. ولذا فإنَّ الراصدَ يرىٰ A **في حقبةٍ زمنيةٍ هي قبلَ B**. وهكذا فإنَّ

○	○	○	○	○	○	●	●	○	○	○	○	○	○	○
○	○	○	○	○	●	○	○	●	○	○	○	○	○	○
○	○	○	○	●	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○
○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	●	○	○	○	○
○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	●	○	○	○
○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	○	○
●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	○

الشكل ٦,٨: نرىٰ هنا تتابُعاً زمنياً تُضاءُ فيه النقاطُ الأبعدُ عن المركزِ بالتدريج. ورغمَ أنَّ النقاطَ كلَّها ثابتةٌ، فإنَّ وهماً ينشأُ مِن أنَّ هناك نقطتيْنِ مُضاءَتَيْنِ فقط، تتحركانِ إلىٰ الخارج. إنَّ التسلسلَ الزمنيَّ هو إلىٰ الأسفل.



الشكل ٦,٩ : مُخَطَّطُ أُنموذجِ التوجيه.
انظرْ المتنَ لمعرفة كيفية عملِ الأنموذج.

طولَ AB كما يقدِّرُه O، في أيِّ وقت، هو **أطولُ** مِن الطولِ الحقيقيّ. وتحت هذه الظروفِ فإنَّ السرعةَ الظاهريةَ لانفصالِ B عن A سوف تتجاوزُ السرعةَ الحقيقية.

ولو أَخذْنا هذه الطريقةَ لحلِّ المسالةِ علىٰ أنها صحيحةٌ، فإنَّ مناقشتَنا، في هذه الحالة، سوف تكونُ بالضرورةِ علىٰ الأُسُسِ نفسِها التي استخدمْناها في فهم صورةِ مجرّةِ «الأندروميدا». ولنتذكرْ بأنَّ الصورةَ، في واقعِ الحال، هي عبارةٌ عن أَجزاءَ مختلفةٍ للمجرّة في حِقَبٍ زمنيةٍ مختلفة. إنَّ تفسيرَ مارتن رِي يَنْبَني، وبالطريقةِ ذاتِها، علىٰ إمكانيةِ أننا نشاهدُ A و B في حقبتيْنِ زمنيتيْن مختلفتيْن. وعلىٰ افتراضِ أنّ A ثابتٌ في مكانه وأنّ B يتحركُ نحوَنا، فإنَّ الضوءَ القادِمَ مِن B إلينا يتوجّبُ أن يُغطّي مسافةً متناقصةً باستمرارٍ مع مرور الوقت، كما يتوجّبُ أن نَحسِبَ حسابَ التأخرِ الزمنيِّ المتزايدِ باستمرار، بين الإشارتيْنِ القادمتيْنِ مِن A و B. وهذا هو السببُ في أنَّ تقديرَنا لسرعةِ

انفصالِهما لسوف يتَّضِحُ بأنه مغلوط، إذْ إننا سوف نحصلُ علىٰ نتيجةٍ مضخّمةٍ يمكنُ أن تتعدىٰ سرعةَ الضوء في أحوالٍ معيَّنةٍ خاصّة.

وتقتضي «الأحوالُ المعيّنةُ الخاصّةُ» أن يكون الخطُّ AB علىٰ خطِّ نظرِ الراصدِ O تقريباً، أي أنّ الزاويةَ AOB يتوجّبُ أن تكونَ صغيرةً جداً، وبحدودِ درجاتٍ قليلة. ويُقالُ بأنَّ هذا هو السببُ في أنّ الحركةَ لا تُرىٰ إلاّ في حفنةٍ صغيرةٍ مِن العددِ الكبيرِ للكوازاراتِ الراديوية.

ولسوف نعودُ إلىٰ «أُخدوعةِ» الإضاءةِ فوقِ الضوئيةِ، في نهايةِ هذا الفصل، مع تفسيرٍ آخرَ ممكنٍ.

ولنتحوّلْ، الآن، إلىٰ «أُخدوعةٍ» أخرىٰ.

انحناءُ الضوء(١)

عندما كان إسحٰقُ نيوتن يُجري بحوثَه علىٰ الضوء، فلقد حَدَسَ بأنَّ الضوءَ قد ينجذبُ إلىٰ المادةِ، بقوّةِ جاذبيةِ الأخيرة. ولقد تساءلَ قائلاً:

«أَوَلا تؤثّرُ الأجرامُ في الضوء، علىٰ مبعدةٍ منه، وبفِعلها تنحني أشعّتُهُ؟ أَوَليسَ هذا الفعلُ (caeterus paribus) هو أقوىٰ ما يكونُ عندما تكونُ المسافةُ علىٰ أقلّها؟».

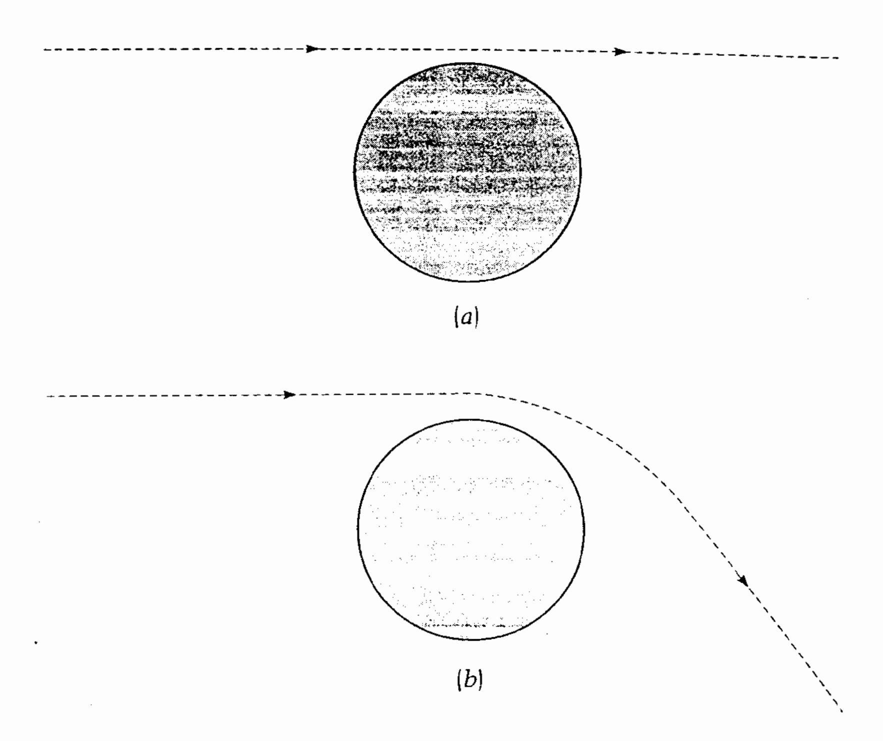
البصريات، التساؤلُ الأول Opticks, Query 1

وليس بالأمرِ المدهشِ أن يَعِنَّ علىٰ بالِ نيوتن بأنْ يفكّرَ باحتمال أن ينحنيَ الضوءُ بفِعلِ الجاذبية، إذا ما نظرْنا إلىٰ عبقريته في الحَدْس، واعتقادِه كذلك بأنّ الضوءَ يتألفُ مِن جُسيمات (هو أسماها **بالكُرَيّات corpuscles**). ولكنَّ نيوتنَ لم يكنْ يمتلكُ وسائلَ للتجاربِ والمراقبةِ لحسمِ حدسِهِ ذاك، ولذا فإنَّه تركَ الأمرَ عند هذا الحدّ.

حساباتٌ «نيوتنية»

ولكنْ بإمكاننا، علىٰ أيّةِ حالٍ، أن نستخدمَ الأفكارَ النيوتنيةَ لحسابِ مقدارِ الانحناء الذي سوف يحدثُ للضوء، إذا ما مَرَّ علىٰ مقربةٍ مِن جسمٍ عظيم. ويُبيّنُ لنا الشكلُ ٦,١٠ هذا الموقفَ، علىٰ افتراضِ أنَّ الفوتوناتِ photons، وهي رُزَمٌ أو مجموعاتٌ

(١) حتىٰ الضوءُ يسير منحنياً، ككلِّ شيءٍ آخرَ في الكون. انظر تفسير قوله تعالىٰ ﴿والسماء ذات الحبك﴾ [الذاريات: ٧] في كتاب الدكتور السعدي «أسرار الكون في القرآن»، ط٢، ١٩٩٩، ص ١٣٣.



الشكل ٦,١٠: يظهرُ هنا، في (أ) و(ب)، اتجاهانِ ممكنانِ لأشعةِ الضوء، باعتبارِهما حشوداً مِن الجُسيمات تخرجُ مِن مكانٍ يقعُ علىٰ مقربةٍ مِن كرةٍ عظيمة. إنَّ الضوءَ لا يتأثرُ بالجاذبية في (أ)، ولكنه يتأثرُ بها في (ب).

صغيرةٌ packets مِن الضوء، تنجذبُ إلىٰ الجسمِ العظيم، حَسَبَ قانونِ نيوتِن للجاذبية. وهكذا فإننا نعزو الكتلةَ (m) إلىٰ الفوتون، مِن خلالِ جَعْلِ طاقتِها مُساويةً لِـ $m\,c^2$، أي الكتلةَ مضروبةً في مربَّعِ سرعةِ الضوء.

ويُرينا الشكلُ حشداً مِن الجُسيماتِ القادمةِ مِن مسافةٍ بعيدةٍ جدّاً، وبسرعةِ الضوء. وعندما تقتربُ هذه الجسيماتُ مِن الجِرْمِ العظيم، فسيحدثُ أَحَدُ أمرَيْن (أ) أن تمتلكَ الجسيماتُ حَصانةً ضِدَّ قوةِ جاذبيةِ الكرة، وهكذا فإنها سوف تستمرُّ علىٰ طولِ الخطِّ المستقيم. (ب) أو يتِمَّ جذبُها مِن قِبَلِهِ، فتنحني حولَهُ وتخرجُ باتجاهٍ آخر.

وقد ننظرُ إلىٰ (أ) و(ب) باعتبارهما نتيجتيْنِ ممكنتيْنِ لِحَدْسِ نيوتِنَ عن الضوء. ويمكنُ في البديلِ الثاني أن نحسِبَ الانحناءَ باعتبارِه الزاويةَ ما بين الاتجاهيْنِ الخارجيْنِ في (أ) و(ب). والجوابُ هو $2GM/c^2$، حيثُ إنّ G هي ثابتُ الجاذبيةِ لنيوتن، و M

كتلةُ الكرة، و c سرعةُ الضوء. ويُعطينا هذا زاويةَ الانحناء، علىٰ شكلِ زوايا نصفِ قطريةٍ radians[١].

ولو قُمنا بحسابِ ذلك لأشعةِ الضوءِ التي تحيطُ بالشمس، فإنَّ الجوابَ سيكونُ زاويةً صغيرةً جداً مِن ٠,٨٧ من الثانيةِ القوسيةِ تقريباً. وتدُلُّ هذه القيمةُ علىٰ التأثيرِ الضعيفِ نوعاً ما للجاذبيةِ النيوتنيةِ في الضوء، وعلىٰ الأقلِّ في منظومتِنا الشمسية، حيثُ الشمسُ هي أقوىٰ جِرمٍ جاذبيٍّ علىٰ الإطلاق.

انحناءُ الضوءِ في الجاذبيةِ العامّة

نعودُ الآنَ إلىٰ النقطةِ التي أجَّلْنا الحديثَ عنها، في الفصلِ السابق. كيف يتأثرُ مسارُ الضوءِ بالجاذبية، حَسَبَ نظريةِ النسبيةِ العامةِ لآينشتاين؟

نحن نتذكّرُ بأنَّ الجاذبيةَ، في نظريةِ النسبيةِ، لا يُنْظَرُ إليها علىٰ أنَّها قوةٌ مِن وجهةِ النظرِ النيوتنية، وإنما يتمُّ التعرّفُ عليها مِن خلالِ تأثيرِها في هندسةِ الزَّمْكان. وهكذا، ولِحَلِّ المسألةِ المماثلةِ لتلك النيوتنيةِ التي نظرْنا فيها توّاً، فإننا نوجدُ الهندسةَ غيرَ الإقليديةِ قريباً مِن الكرةِ الجاذبةِ أولاً، ثمَّ نقومُ بحسابِ مسارِ أشعةِ الضوءِ في زَمْكانٍ كهذا.

لقد قُمنا بوصفِ المسارِ الأولِ للمسألةِ في الفصلِ الخامس، وقد بيَّنَ كارل شوارزجايلد كيفيةَ حسابِ هندسةِ الزَّمْكانِ خارجَ كرةٍ هائلة. وأمّا الجزءُ الثاني منها فإنَّه يكونُ، مِن ثَمَّ، بسيطاً. ويتوجّبُ علينا أن نُحدِّدَ الجيوديساتِ[٢] المعدومة null geodesics في زمْكانٍ كهذا.

ولقد واجهْنا الخطوطَ الجيوديسيةَ، مِن قَبْلُ، علىٰ شكلِ مُكافِئاتٍ زمكانيةٍ منحنيةٍ للخطوطِ المستقيمة التي تُوصِلُ ما بينَ نقطتيْنِ زمكانيتيْن (انظرْ الفصلَ الخامس). وبالنسبةِ إلى جُسيماتِ المادةِ، فإنها هي خطوطُ الوجودِ التي تصِفُ «الحركةَ المنتظَمَةَ في خطٍّ مستقيم». إنَّ جسيماتِ المادة تتبعُ هذه المساراتِ المنحنيةَ trajectories عندما تكونُ

---

(١) radius = شعاعٌ = نصفُ قطرٍ. radians = زاويةٌ نصفُ قُطريةٍ. وحتى نحوّلَ الزاويةَ نصفَ القطريةِ إلى ثَوانٍ قُطرية، فثَمَّةَ قاعدةٌ تقريبيّةٌ جاهزةٌ لذلك، وهي أن نضربَها في ٢٠٠٠٠٠. إنّ النسبةَ AB/OA، في الشكل ٦,٦، تُعطينا الزاويةَ مَقيسةً بالزوايا نصفِ القطرية. وإذا كان OA = AB، فإنّ الزاويةَ تساوي عندها زاويةً نصفَ قطريةٍ واحدة.

(٢) الجيوديسيُّ geodesic هو أقصرُ خطٍّ بين نقطتيْنِ علىٰ سطحِ (المورد).

تحت تأثيراتِ الجاذبيةِ التي جعلت الزَّمكانَ غيرَ إقليديّ. ولذا فإنَّ الضوء أيضاً يجبُ أن يتّبعَ خطوطَ وجودٍ كهذه، وبشرطٍ إضافيٍّ وهو أن تكونَ خطوطَ انعدامٍ null lines[1].

وعلىٰ الضِّدِ مِن الحالةِ النيوتنية، ليس ثَمَّةَ أيُّ التباسٍ أو غموضٍ، في هذه الحالة. فعندما يسيرُ في الزَّمْكانِ بهندسةٍ تحدّدُها الجاذبيةُ، **فإنَّ علىٰ الضوءِ أن يُعدِّلَ مِن مَساره**. وحسبَ الخواصِّ الإقليديةِ لِـ «الاستقامةِ»، فإنَّ أشعةَ الضوءِ تنحني. وبتعبيرٍ أصحَّ، فإنه بوجودِ الهندسةِ اللاإقليديةِ المسيطرة، فإنَّ مسارَ «الخطِّ ـ المستقيم» الذي يتّخذُهُ الضوءُ حسبَ قواعدِ هذه الهندسةِ سيكونُ مختلفاً عن المسارِ الإقليدي.

ولكنْ، ولمّا كُنّا نقارنُ النتيجةَ مِن وجهةِ نظرٍ نسبيةٍ بالبديلِ النيوتنيّ (ب)، وكما في القسمِ السابق، فلسوف نستخدمُ التعبيرَ الأكثرَ مطّاطيةً، ولكنْ الأكثرَ استخداماً، وهو تعبيرُ «حَنْي الضوء» the bending of light.

وكَمْ هو انحناءُ الضوء؟ فأمّا وقد رأيْنا الجوابَ النيوتنيَّ، فإنَّ مِن اليسيرِ ذِكرَ الجوابِ النسبيّ. **إنه يبلغُ، بالضبطِ، ضِعفَ القيمةِ النيوتنيّة**. وبعبارةٍ أخرىٰ، فإنَّ حنيَ الضوءِ المارِّ قريباً مِن الشمس سيكونُ بزاويةٍ مقدارُها ١,٧٤ من الثانيةِ القوسية.

ورغمَ أنَّ التفاصيلَ المضبوطةَ لهندسةِ الزَّمْكانِ المحيطِ بكتلةٍ كرويةٍ صارت متوفرةً عامَ ١٩١٦، بعدَ بحوثِ شوارزجايلد، فلقد قام آينشتاينُ نفسُه بحسابِ الحَنْيِ النسبيِّ للضوء، عامَ ١٩١٥، بعد صياغةِ معادلاته للجاذبيةِ مباشرةً. وفي تلك الأيامِ الأولىٰ لم يَفْهَمْ ما الذي كانت تعنيهِ النسبيةُ العامّةُ إلاّ علماءُ قليلونَ جدّاً. ولقد وجدَ معظمُهم فكرةَ الهندسةِ غيرِ الإقليديةِ، مُطبَّقةً علىٰ الزَّمْكانِ، فكرةً هي غايةٌ في الغرابةِ وضِدَّ البديهة.

ولكنَّ أدنغتون كان واحداً مِن القلائلِ الذين تمكنوا مِن فهمِ جوهرِ النسبيةِ العامّة. وباعتباره عالِماً فلكياً مَرَّ عَبْرَ صرامةِ ومشقّةِ اختباراتِ درجةِ الشرف في الرياضياتِ في كامبريدج[2]، فإنه لم يتمكنْ مِن أن يُقَدِّرَ روعةَ النسبيةِ العامّةِ وحَسْب، ولكنْ ومع خلفيتهِ الفلكية، فلقد كان في إمكانه أن يفكرَ في الحصولِ علىٰ فحصٍ فلكيٍّ لحَنْيِ الضوء.

---

(١) نذكِّرُ القارئ أنه علىٰ طولِ خطِّ الانعدام، فإنَّ الانفصالَ ما بين أيِّ نقطتين يساوي صفراً، عندما يُقاسُ حسب قواعد النسبية (انظر العنوانَ الفرعي «سرعة الضوء»، في الفصل الخامس).

(٢) حاز أدنغتون علىٰ أعلىٰ درجاتِ الشرف، في وجبةِ عامِ ١٩٠٤، في كامبريدج.

بعثةُ كسوفِ عامِ ١٩١٩

إنَّ الشكلَ ٦,١١ هو تحويرٌ للاحتمالِ الثاني الموجودِ في الشكل ٦,١٠. وهو يُظهرُ النجمَ A الذي يضربُ ضوؤُهُ سطحَ الشمسِ قبل أن يصِلَ إلىٰ المُشاهد. ولذا فإنَّ الراصدَ يرىٰ صورةَ النجمِ A^1 بدلاً مِن النجم A، أي أنَّ صورةَ النجمِ تقفزُ مِن مكانِها الطبيعيِّ **لو حدث أنها كانت خلفَ الشمسِ مباشرةً.**

إنَّ المَيَلانَ المتوقَّعَ في اتّجاهِ النجم لا يزيدُ علىٰ ١,٧ ثانيةٍ قوسيةٍ تقريباً. إلاَّ أنَّ هناك معضلةً عملية، إذ كيف يمكنُ أن نَرىٰ النجمَ بوجودِ ضوءِ الشمس المُبهرِ أمامَنا؟ ليس هذا بالأمرِ الممكنِ إلاَّ وقتَ حدوثِ كسوفٍ كلِّيٍّ للشمس.

لمّا أدركَ أدنغتون ذلك اقترحَ قياسَ هذه الظاهرة، في وقتِ حدوثِ كسوفٍ كليٍّ للشمس، في ٢٩ مايس ١٩١٩. ولقد مَكَّنَتْهُ مِن ذلك مِنحةٌ مِن الفلكيِّ الملكيِّ السير فرانك دايسون، ومقدارها ألفُ جنيهٍ استرلينيّ. وقد تمَّ تأليفُ فريقيْنِ للقيامِ بهذه المهمّة. قام أحدُ الفريقيْنِ، وكان يتكوّنُ مِن أدنغتون ذاتِه وكوتنغهام، بالارتحالِ إلىٰ جزيرة برنسِبل في خليج غينيا، وأمّا الآخَرُ، وكان يتكوّنُ مِن ديفدسون وكروملِن، فقد توجّهَ إلىٰ سوبرال في البرازيل.

وفي خاتمةِ المطاف (ولأنَّ مشاهداتِ الكسوفِ يمكنُ أن تحدثَ بمحضِ

الشكل ٦,١١ : إنَّ الخطَّ المنقّطَ هو الخطُّ الإقليدي المستقيم الذي يسيرُ عليه الضوءُ القادمُ مِن النجم A نحو المشاهد O، عندما لا تكونُ الشمسُ في أيِّ مكانٍ قريبٍ مِن خطِّ النظرِ هذا. ولكنْ لو صارت الشمسُ في طريقِ هذا الضياء، فإنَّ جاذبيتَها تغيّرُ الهندسةَ التي هي علىٰ مقربةٍ منها، فتجعلُها هندسةً غيرَ إقليدية. وعندها «ينحني» الضوءُ القادمُ مِن A، مُمَثَّلاً بالخطِّ المستمر، فيرىٰ المشاهدُ O صورةَ A في A^1 علىٰ طولِ مُماسِّ مسارِ الضوءِ في O.

المصادفة!)، فقد تُوِّجَ عملُ كلا الفريقيْنِ بأحوالِ رؤيةٍ ممتازة، وأمكنَ إجراءُ القياساتِ المطلوبة.

قام السير فرانك دايسون، في تشرين الثاني مِن عام ١٩١٩، بالإعلانِ عن نتائج المشاهدات، في اجتماعٍ حاشدٍ للجمعيةِ الملكية والجمعيةِ الفلكيةِ الملكية. وكانت ثَمَّةَ توقعاتٌ وإثارةٌ عظيمتانِ، حولَ ما عسىٰ أن تكون نتائجُ البحث. هل سوف يُرينا الضوءُ أيَّ حَنْيٍ علىٰ الإطلاق؟ هل إنه سوف ينحني كما قد تمَّ حسابُه بالطرُقِ النيوتنية؟ أم إنَّ الجوابَ سيُرَجِّحُ كفّةَ النسبية؟ لقد امتلكَ وايتهيد، الذي حضرَ الاجتماعَ، ناصيةَ هذا المشهدِ بهذه الكلمات:

> كان الجوُّ مليئاً بالإثارةِ البالغة، وكأنّه مأساةٌ إغريقيةٌ تماماً: لقد كنا أشبهَ بمجموعةٍ مِن المنشدينَ وهي تُعَقِّبُ علىٰ حكم بالقضاءِ والقَدَر، إذ هو يعلنُ عن حدوثِ أمرٍ جَلَل. وكانت ثَمَّةَ، في خلفيةِ القاعةِ، صورةٌ لنيوتن، حتىٰ تُذكِّرَنا بأنَّ أعظمَ تعميمٍ علميٍّ طرّاً، وبعدَ أكثرَ مِن قرنيْنِ مِن الزمان، صارَ لا بُدَّ مِن إجراءِ أوَّلِ تعديلٍ عليه...

وأمّا النتائجُ فلقد رجَّحَتْ النسبيةَ العامةَ، بالفعل. وكان حَنْيُ الضوء، ضِمنَ الأخطاءِ المُقَدَّرَة، أقرب لمقدارِ ١,٧٤ ثانيةٍ قوسية مِن نصفِ هذا المقدار الذي نحصلُ عليه مِن الجاذبيةِ النيوتنية.

ولقد جعلَ نجاحُ بعثةِ الكشوفِ تلكَ، مِن آينشتاينَ، وعلىٰ الفورِ، شخصاً مشهوراً. ورغمَ أنَّ فكرةَ الزَّمْكان المنحني لا تزالُ فوق أفهامِ أكثرِ الناس، فلقد أكّدَتِ النتائجُ أنَّ الطبيعةَ يبدو أنّها تتّبِـعُ، فعلاً، مِثلَ هذه الآراءِ التي تبدو مجنونة.

وكان ذلك، بالطبع، أوّلَ مؤشّرٍ لعلماءِ الفلكِ علىٰ أنَّ المواقعَ المشاهَدةَ للصُّوَرِ في السماء قد لا تمثّلُ الحقيقةَ تماماً، بسببِ حَنْيِ الضوءِ مِن قِبَلِ الكُتَلِ الموجودةِ في طريقه.

علىٰ أنَّ عُقوداً عديدةً كان لا بدَّ أن تمرّ، حتىٰ يُفْهَمَ ذلك جيّداً.

انتقالةٌ

اهتزّ أدنغتون نفسُه طَرَباً، مِن شِدّةِ الإثارةِ المتسببةِ عن كسوفِ الشمسِ الكليِّ ذاك، فَحَفَزَهُ ذلك إلىٰ أن يَنْظُمَ مُحاكاةً ساخرةً للرباعيّاتِ المشهورة:

إيهِ يا قَمَرَ فرحتي، أيُّها الموغِلُ في مُحاقِه،
لقد وَصَلَ القمرُ في السماءِ، مِن جديدٍ، نقطةَ الالتقاء
ولكنَّ الغيومَ تتلبّدُ في السماءِ المُكْفَهِرَّة

فوق هذهِ الجزيرةِ ذاتِها، حيثُ شقينا طويلاً ـ عبثاً؟
وإنني لَأَعلَمُ الآنَ، إن كان **آينشتاينُ** قد أصاب
أم إن نظرياتهِ قد تبدّدتْ، كلُّها، وصارت هباءً منثوراً،
فلقد أمسَكَتْ نظرةٌ خاطِفةٌ إلىٰ النجومِ، في وسطِ العُتمةِ،
بما لم تَظْفُر به ساعاتٌ مِن الكدْحِ الطويل، علىٰ ضوء الشموع. . .
وإنّ هناكَ لشيئاً واحداً، علىٰ الأقلّ، أكيداً، وهو أنَّ لِلضياء **لَوَزْنا**
شيئاً واحداً أكيداً، وما بَقِيَ إنما هو أمرٌ مُجادَلٌ فيه ـ
أن أشعةَ الضياءِ، عندما تكونُ قريبةً مِن الشمس، **لا تسيرُ بصورةٍ مستقيمة**.

ولكن قد كان هناك وجهٌ آخَرُ لتلك البعثة.

فلقد كان لبعثةِ كسوفِ شمسٍ عام ١٩١٩، والتي زوّدتْنا بأوّلِ دليلٍ منظورٍ علىٰ حَنْيِ الجاذبيةِ للضوء، ناتِجٌ آخَرُ عَرَضيّ، وهو مسألةُ أدنغتون في نظريةِ الاحتمالات Eddington's problem in probability theory.

وكما بَيَّنّا، فلقد انتُدِبَ أربعةُ مراقبينَ لعملِ قياساتِ الكسوفِ، فذهبَ ديفدسون وكروملِن للمراقبةِ في سوبرالَ في البرازيل، بينما ذهبَ كوتنغهامُ وأدنغتون إلىٰ جزيرة برنِسِبل في خليجِ غينيا. ولقد اعتمَدَت أمورٌ كثيرةٌ علىٰ النتائجِ التي توصّلوا إليها. فهل سوف نرىٰ أيَّ حَنْيٍ للضوءِ مِن قِبَلِ الجاذبية؟ وهل سوف تكونُ النتيجةُ كتلك التي توقعَتْها جاذبيةُ نيوتنَ (المُوَلِّدَة)، أم ستبلغُ ضِعْفَيْها، كما توقعَ آينشتاين؟

لقد أشارَ كروملِن، في خُطبةٍ له بوليمةٍ أُقيمت لهم قبلَ أن يشرعوا في حملَتِهم، إلىٰ المراقبينَ الأربعة بالحروف C, C^1, D, E، وألمحَ إلىٰ أنَّ أيَّ واحدٍ منهم قد يشعُرُ بإغراءٍ لِلَيِّ ذراعِ الحقيقةِ، بين الحينِ والحين! ولقد قام أدنغتون، بعد ذلك، بإعادةِ التعبيرِ عن المسألةِ، علىٰ الشكلِ التالي:

إنَّ A و B و C و D يقولون الحقيقةَ مرّةً واحدةً مِن كلِّ ثلاثِ مرّات (مستقلّينَ عن بعضهم البعض). يُدلي D ببيانٍ، ويؤكّدُ A أنَّ B ينفي أنّ C يُعلنُ بأنّ D يكذبُ في أقواله. فما هو احتمالُ أنّ D يقولُ الحقيقةَ فعلاً؟

ولكنْ ما هو جوابُك؟

يمكنُ أن يتمَّ حلُّ هذه المسألةِ الملتويةِ باستخدام براهينَ مبنيةٍ علىٰ احتمالاتٍ شرطية. حاوِلْ، لو أرَدْتَ، أن تَحُلَّ هذه المسألة! أمّا الجوابُ فهو أنَّ احتمالَ قولِ D للحقيقة هو ٢٥ من ٧١.

وعلىٰ أيّةِ حالٍ، وباستعادةِ الأحداثِ الماضية، فإنَّ الفلكيينَ يعترفونَ الآنَ بأنَّ نتائجَ بعثةِ ١٩١٩ لم تكنْ حاسمةً، فعلاً، كما قد قِيلَ عنها حينئذٍ، لأنهم قلّلوا مِن شأنِ الأخطاءِ التي حدثتْ في أثناءِ البحث.

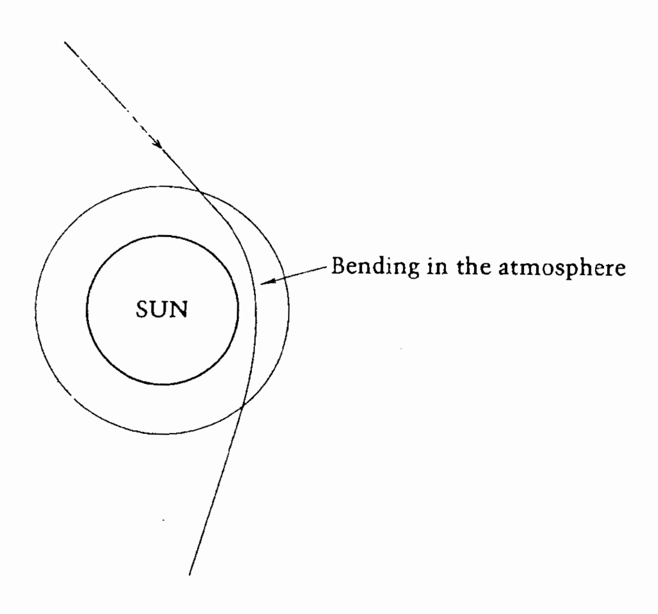
وفي واقعِ الحال، فإنَّ أيّةَ نتيجةٍ تجريبيةٍ مبنيةٍ علىٰ قياساتٍ عديدةٍ لا تنجو مِن أخطاءٍ في البحثِ لا يملكُ الباحثُ سيطرةً عليها. ويمكن أن تحدثَ هذه الأخطاءُ لأسباب عديدة. إذ إنَّ حساسيّةَ أداةِ القياسِ محدودةٌ، فمثلاً إن قضيباً متريّاً ذا تقسيماتٍ مِن مليمترٍ واحدٍ لا يمكنُه أن يقومَ بقياساتٍ ذاتِ دِقّةٍ تزيدُ علىٰ المليمترِ الواحد. ولقد كانت الأداةُ البصريةُ التي استُخدِمَتْ في بعثةِ عامِ ١٩١٩ ذاتَ حساسيةٍ محدودة.

وهناك أخطاءٌ قد تحدثُ كيفما اتّفقَ، وهو ما يتسببُ في أن تصيرَ القياساتُ المفردةُ أكبرَ أو أقلَّ مِن المعدّل. وتنشأُ مِثلُ هذه الأغلاطِ عند مقارنةِ صُوَرِ الحقلِ النجميِّ مع الشمسِ وبدونِها. وهناك أيضاً أخطاءٌ منهجيّةٌ تنجُمُ عن تأثيراتٍ إضافيةٍ لم يُفْطَنْ إليها ولم يُحْسَبْ حسابُها في وقتِ إجراءِ التجربة.

وفي حالةِ بعثةِ كسوفِ عامِ ١٩١٩، فلقد كان هناك أحَدُ التأثيراتِ المنهجية التي لم يُفطَنْ إليها ولم يُحسَبْ حسابُها، وهي حَنْيُ الضوءِ الناتج عن الانكسارِ، عند مرورِ الضوءِ عَبْرَ وَسَطٍ متغيّر (لقد واجهْنا هذا التأثيرَ في الفصلِ الأول). ولمّا كانت الشمسُ تملكُ جوّاً يُحيطُ بها، فإنَّ أشعةَ الضوءِ التي تمُرُّ بصورةٍ مائلةٍ عبر هذا الجوِّ سوف يتمُّ حَنْيُها، بسببِ اختلافِ كثافةِ ودرجةِ حرارة الوسطِ الذي تمُرُّ مِن خلاله. ويُرينا الشكلُ ٦,١٢ هذا التأثيرَ، بشكلٍ مبالغٍ فيه. وبالنسبةِ إلىٰ أطوالِ الموجاتِ البصرية، فإنَّ هذا التأثيرَ صغير، ولكنْ لا يمكنُ القولُ بأيِّ ادعاءٍ حولَ حني جاذبيةِ الشمسِ للضوءِ إلاّ بعد أن نُدخِلَ في حسابِنا الأثرَ السابق.

ولقد ظلّت الدِّقّةُ محدودةً في تجاربَ بصريةٍ مشابهةٍ أُجرِيَتْ خِلالَ كسوفاتٍ تالية. ورغمَ أنَّ بإمكاننا أن نُظهِرَ بأنَّ حنيَ الضوءِ كان أقربَ إلى القيمةِ النسبيةِ مِن النيوتنية، فإنَّ ذلك لم يتأكدْ بدقّةٍ عالية. ولم يتمَّ العثورُ على حلٍّ لذلك حتى سبعيناتِ القرنِ العشرين، **باستخدامِ الموجاتِ الدقيقةِ «المايكرو ويف» عوضاً عن الضوءِ المرئيّ**. ولذلك فوائدُ ثلاثٌ.

وأولاها، أنَّ الانحناءَ الناتجَ عن الانكسارِ يمكنُ تقديرُه وتعليلُه، مِن خلالِ إجراءِ



الشكل ٦,١٢ : حَنْيُ الضوءِ الناتجِ عن انكساره، عند مسيره عبر جوِّ الشمس، ويظهرُ على نحوٍ مُبالَغٍ فيه.

القياساتِ على طولَيْنِ موجييْنِ اثنينِ، في الوقتِ ذاتِه، وهكذا فإنّها لن تشوِّشَ النتيجة. وثانيهما أنَّ الشمسَ ذاتَها ليست ساطعةً بالموجاتِ الدقيقة، ولذا فلو كان لدينا مصدرٌ قويٌّ لأشعةِ الموجاتِ الدقيقةِ، في الخلفيةِ، فإنّه يصيرُ بإمكاننا أن نقومَ بعملِ التجربةِ **مِن دونِ الحاجةِ إلى الانتظارِ لكسوفٍ شمسيٍّ كليّ.**

وإذْ أخذَ علماءُ الفَلَكِ الراديويِّ radioastronomers ذلك بعيْنِ الاعتبار، ومِن خلالِ استخدامِ موجاتٍ ذاتِ أطوالٍ موجيةٍ تقعُ على مدى ١٠ ـ ٤٠ سنتمتراً، فقد رصدوا التغيُّرَ الحاصلَ في اتجاهِ الكوازارِ المسمى $_{3}C_{279}$، عندما صادفَ مرورُ الشمسِ عَبْرَ خطِّ مشاهدته. ويمكنُ أن نقيسَ مَيَلانَ موقعِ هذا الكوازار بالنسبة إلى كوازارٍ آخرَ قريبٍ، وهو $_{3}C_{373}$.

وأخيراً، فلقد كانت تقنياتُ قياسِ التداخلِ الراديويِّ (المدخالِ الراديويّ) radiointerferometry أكثرَ دِقّةً بكثيرٍ مِن تلك التي كانت متوفرةً للفلكيينَ البصريين، ولذا فإنَّ أخطاءَ هذه التجاربِ صغيرةٌ جدّاً. ولقد كانت النتيجةُ، ومِن دونِ أيِّ اشتباهٍ بالخطإِ، مُرجِّحةً لنظريةِ النسبيةِ العامّة، ضمنَ خطإٍ للتجربةِ يبلغُ واحداً في المائة.

العَدْسُ الجاذبيُّ (أي القيامُ بعملِ العدساتِ الناجمُ عن الجاذبية)(١)
Gravitational lensing

يُرينا الشكلُ ٦,١٣ عدسةً اعتيادية، مِن النوعِ المستخدَمِ في العدساتِ المكبِّرة. ويُرينا مخطَّطُ الأشعةِ كيفيةَ حدوثِ التكبير. إنَّ الأشعةَ الخارجَةَ مِن الجسم AB تبدو وكأنها جاءت مِن مصدرٍ أكبرَ بكثيرٍ هو A^1B^1، والذي هو الصورةُ «الحقيقيّةُ» لِـ AB.

والعدَساتُ أنواعٌ عديدةٌ، ولتلك التي نراها في الشكل ٦,١٣ سطحانِ **محدّبان**. وهناك عدساتٌ ذاتُ سطوحٍ **مقعّرةٍ** من الجانبين، أو هي ذاتُ سطحٍ محدَّبٍ وآخرَ مقعّرٍ. وكلّها تكوّنُ صوَراً للأجسامِ الحقيقيةِ، مِن خلال حَنْيِ أشعةِ الضوءِ بصورةٍ مناسبة. وبالطبع، فإنَّ سببَ الحَنْيِ هنا هو **الانكسار refraction**.

ولمّا كان يمكنُ للجاذبيةِ أن تسبّبَ حَنْيَ الضوءِ أيضاً، فهل يمكنُنا، بالمِثل، أن نواجهَ مواقفَ تُنتِجُ الظاهرةُ فيها عدساتٍ؟ لقد أثيرَ هذا الموضوعُ، أوّلَ مرّةٍ، في ثلاثيناتِ القرنِ العشرين، مِن قِبَلِ فريتز زويكي، وهو فلكيٌّ كان يعملُ في مؤسسةِ كاليفورنيا للتقنية، ولقد كتبَ في عامِ ١٩٣٧ يقول:

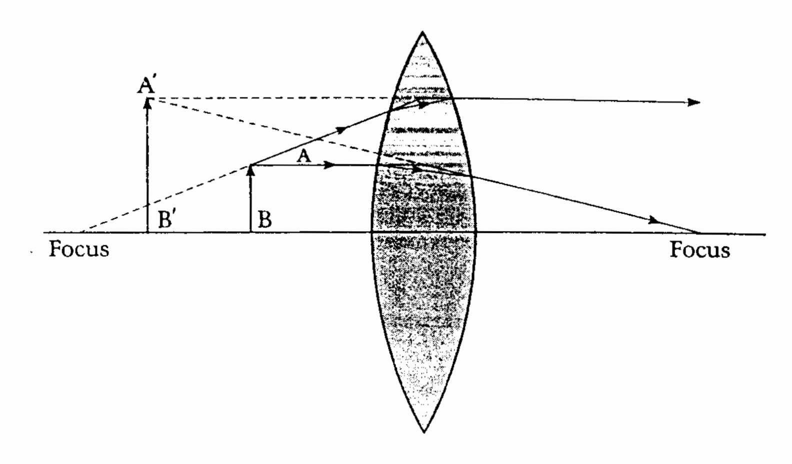
> ذكرَ لي الدكتورُ زوريكِن، في الصيفِ الماضي (والذي اقْتُرِحَتْ له الفكرةُ ذاتُها مِن قِبَلِ السيد ماندل)، إمكانيةَ تكوينِ صورةٍ عَبْرَ تأثيرِ حقولِ الجاذبية. وكنتيجةٍ لذلك، فلقد قمتُ ببعضِ الحساباتِ التي أظهرَتْ أنَّ السُّدُمَ خارجَ المجرّاتِ تُعطي فرصةً أفضلَ بكثيرٍ مِن النجومِ لمراقبةِ تأثيرِ الجاذبيةِ في القيامِ بعملِ العدسات.

ولقد اقترحَ زويكي استخدامَ العَدْسِ الجاذبيِّ، للكشفِ عن المادةِ السوداء، وهي مادةٌ لا يمكنُ رؤيتُها، ولكنْ يمكنُ لتأثيراتِها الجاذبةِ، على الرغمِ مِن ذلك، أن تحنيَ الضوءَ الصادرَ عن المادةِ المرئية. ولسوف نُشيرُ إلى المادةِ السوداءِ، مرّةً أخرى، في الفصلِ القادم.

وقد يحدثُ، في أحيانٍ نادرةٍ، أن تبقىٰ فكرةٌ نافذةُ البصيرةِ في طيِّ الإهمالِ والنسيان، لأنَّ جُمهورَ العلماءِ لم يَصِرْ جاهزاً لها بَعْدُ. لقد كانت أفكارُ زويكي متقدمةً على زمانها بثلاثةٍ إلى أربعةِ عقود، ولم يتمَّ تذكّرُها وتقديرُها إلاّ بعدَ ذلك بفترةٍ طويلةٍ، عندما لم يَعُدْ هو نفسُه موجوداً.

---

(١) العَدَسَةُ، حَسَبَ قاموسِ وِبْستَر الإنكليزيّ، هي كلُّ ما يلمُّ أو يُفرّقُ الإشعاعَ، بوساطةِ الانكسار. واشتَقَّ المترجمُ الفعلَ عَدَسَ يَعْدِسُ عَدْساً، للدلالة علىٰ كلِّ ما يلمُّ أو يفرّقُ الضوء، من اسمِ العدسةِ، لعَدَمِ وجوده في العربية. د.س



الشكل ٦،١٣: العدسةُ المحدّبة. لقد رُسِمَتْ أشعةُ الضوءِ لتوضيحِ كيفيةِ تكوّنِ الصورةِ الحقيقيةِ للمصدرِ AB في A^1B^1.

وكان مصيرُ أبحاثِ رفسدال وبارنوثي، في أواسطِ ستيناتِ القرنِ العشرين، هو ذاتَه تقريباً. لقد استكشفَ كلٌّ منهما، على حِدَة، إمكانيةَ العَدْسِ الناتجِ عن كُتَلِ المجرّاتِ، وتأثيرَهُ في صُورِ الكوازارات، وهي التي ابتدأَ اكتشافُها حينئذٍ (انظرْ الفصل ٥). وقد نُظِرَ إلى آرائِهما على أنّها أفكارٌ غريبةٌ وماتِعةٌ، ولكن بعيدةٌ عن خطوطِ البحثِ المتعارَفِ عليها.

ولكنَّ الموضوعَ تفجّرَ فجأةً، عامَ ١٩٧٨ ـ ١٩٧٩، مُطلِقاً ومُبرِزاً موضوعَ العَدْسِ الجاذبيِّ إلى وسطِ المسرح. وهكذا فإنَّ نبوءةَ زويكي، التي عَبَّرَ عنها عامَ ١٩٣٧، قد تحقَّقَتْ أخيراً:

> إذا كانت تقديراتُنا الحاليةُ لكُتَلِ عناقيد السُّدُم cluster nebulae صحيحةً، فلسوفَ يصيرُ احتمالُ وجودِ السُّدُمِ التي تعملُ باعتبارها عدساتٍ جاذبيةٍ شيئاً مؤكَّداً في واقعِ الحال.

اكتشافُ أولِ عدسةٍ للجاذبية

كان الإعلانُ عمّا يمكنُ أن يكون أولَ مثالٍ على عدسةٍ للجاذبيةِ gravitational lense، في مجلة «نيتشر»، مِن قِبَلِ ثلاثةِ فلكيينَ، هُم دينيس والش مِن مختبراتِ نافيلد لِعلمِ الفلكِ الراديويِّ في جودريل بانك بالمملكةِ المتحدة، وبوب كارسويل مِن مؤسسةِ علمِ الفلكِ في كامبريدج، وراي وايمان مِن مرصدِ ستيوارد التابعِ لجامعةِ أريزونا. أحدثَ

هذا الإعلانُ إثارةً وجدلاً عظيميْن، ولمّا كانت تلكَ أوّلَ حالةٍ مِن نوعِها، فلقد كان الفلكيونَ حذرينَ بالطبع مِن قبولِ التفسيرِ الذي اقترحَهُ هؤلاءِ الباحثون.

وقبل أن ندخلَ في تفاصيلِ هذه «العدسةِ» المفترضةِ وتفسيرِها النظريّ، فلنقمْ بإلقاءِ نظرةٍ سريعةٍ علىٰ تاريخها. ذلك لأنَّ السبيلَ الذي أدّىٰ إلى اكتشافِها لم يكن بالطريقِ اللاحب، بل كان طريقاً متعرِّجاً ذا مُنعطَفاتٍ تصادفيةٍ لم يكنْ لها مِن داعٍ!

وابتدأَتِ القصةُ، كما رواها والش نفسُه، بعد أعوامٍ قلائل، في مؤتمرٍ أُقيمَ حول العَدْسِ الجاذبيّ، في أوائلِ سبعيناتِ القرنِ العشرين، عندما تمَّ تحديثُ مِرْقابِ مارك الأولِ، في جودريل بانك (انظرْ الشكل ٦,١٤). قام برنارد لوڤيل، وهو مديرُ المرصد، بالطلبِ مِن العاملينَ في المختبراتِ أن يقدّموا اقتراحاتٍ جديدةً لإجراء الرَّصْدِ بالصحنِ الجديد.

كان عِلمُ الفلكِ الراديويُّ radioastronomy يدخلُ، في ذلك الوقتِ، في طَوْرٍ جديد، حيثُ مَكّنَت التطوراتُ التقنيةُ الفلكيينَ مِن أن يقوموا بإجراءِ دراساتٍ أكثرَ تفصيلاً للمصادرِ الراديوية، وأن يقوموا أيضاً بتحديدِ مواقعِ المصادرِ الراديوية في السماءِ، بدقّةٍ أكبر. وكما رأيْنا في الفصلِ السابق، فلقد تمَّ تحديدُ موقعِ المصدرِ $3C_{273}$ المضبوط، بوساطةِ خسوفِ القمر، ومكّنَ هذا الفكليينَ البصريينَ مِن «رؤيةِ» المصدرِ، أي تحديدَه بصرياً. وهكذا فلقد تمَّ، بهذه الوسيلةِ، اكتشافُ صنفٍ جديدٍ مِن المصادرِ الراديويةِ التي تُعرَفُ بالمصادرِ الراديويةِ شبهِ النجمية quasi-stellar radio sources. ولذا فقد كان هناك الكثيرُ ممّا يمكنُ كسبُه مِن خِلالِ الحصولِ علىٰ مواقعَ مضبوطةٍ جدّاً للكثيرِ مِن المصادرِ الراديوية مِمّا لم يتمَّ التعرّفُ عليه حتى ذلك الوقت.

وتشملُ عمليةُ التعرّفِ البصريِّ البحثَ عن مصدرٍ بصريٍّ ضمنَ مستطيل الخطإِ للموقعِ الراديويّ. وقد توجدُ في المستطيلِ مصادرُ عديدةٌ، في الأحوالِ الطبيعيةِ، وقد يحتاجُ الفلكيُّ البصريُّ إلى وسائلَ تشخيصيةٍ أخرى، كطيفِ المصدرِ، حتىٰ يتأكدَ مِن أنه هو المصدرُ ذاتُه الذي لوحظَ في الراديو حقّاً. وكلّما كان مستطيلُ الخطإِ أصغرَ كلّما صارت عمليةُ التعرّفِ أسهلَ وأوكد.

وقد اقترحَ دنيس والش استخدامَ المِرْقاب المطوَّرِ، مُضافاً إلى الصحنِ المعروف باسم مارك ـ ٢، ذي الخمسةِ والعشرين متراً، للحصولِ على مقياسِ تداخُلٍ بتفاصيلَ أكثرَ وضوحاً (وقد شرحْنا هذه التقنيةَ فيما يخصُّ VLPI، في مُقتَبَلِ هذا الفصل). وهذا



الشكل ٦,١٤ : صحنٌ يبلغُ قطرُهُ ٧٦ متراً، يعودُ لِمرقابِ لوڤيل في جودريل بانك.

يسمحُ بتحديداتٍ أكثرَ دقّةً لمواقعِ المصادرِ الراديويةِ في السماء، وهو ما سوف يساعدُنا بدورِه على التعرّفِ عليها بصرياً.

ابتدأ والش، مع كلٍّ مِن دينتري، وبراون، وبوركاس، المراقَبةَ في تشرينِ الثاني مِن عامِ ١٩٧٢، على أن يقوموا بعملهم خلالَ شهرٍ واحد، ولكنَّ عراقيلَ عديدةً برزت، ولم يتمكنِ الفريقُ مِن إنهاءِ مهمَّته في الفترةِ المحدَّدة. وسارعَ لوڤيل، الذي كان قد تحمّسَ كثيراً للنتائجِ التي تمَّ التوصّلُ إليها حتىٰ ذلك الوقت، إلى مدِّ يدِ العونِ لهم، وباعتباره

مديراً للمرصد فقد منحَهم شهراً إضافياً لإتمام العملية. وكانت تلك هي الأولىٰ مِن سلسلةٍ مِن المصادفاتِ السعيدةِ التي ساعدَتْ في العثورِ على العدسة.

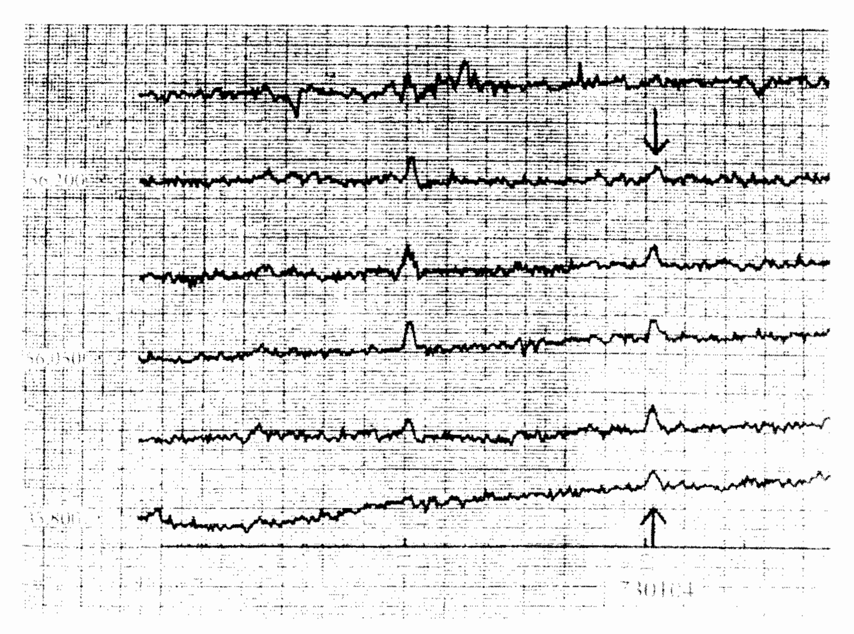
وفي ٤ مِن كانونِ الثاني، عامَ ١٩٧٣، قامَ الفريقُ بالكشفِ عن مصدرٍ راديويٍّ أُعطيَ الرقمَ المفهرسَ 56+ O 958. ويُظهِرُ الشكلُ ٦,١٥ بروزاً للشدةِ في الماسحاتِ الضوئية، وهو ما أوحىٰ للفريقِ بوجودِ مصدرٍ راديويٍّ جديد. وكان هذا المصدرُ مؤهلاً للعبِ دورٍ أساسيٍّ في اكتشافِ أوَّلِ عدسةٍ ناجمةٍ عن الجاذبية.

وكانت الخطوةُ التاليةُ في التعرّفِ البصريِّ على المصدر، بقياسِ الموقعِ بصورةٍ أدقّ، من طريقِ صحنٍ ذي ٣٠٠ قدم، في المرصدِ الفلكيِّ الراديويِّ الوطني (NRAO) في غرين بانك، في الولاياتِ المتحدةِ الأمريكية، ولقد قامَ بذلك ريتشارد بوركاس. ويُرينا الشكلُ ٦,١٦ ما الذي عثَرَ عليه بوركاس، ونرى في ٦,١٦(أ) صورةً للمسحِ الذي قامَ به «ماسِحُ السماءِ پالومار» Palomar Sky Survey مع الجسمِ الذي يُرَقَّمُ الآنَ باعتباره 561+ O 957، وهو مُعَلَّمٌ بخطّيْنِ اثنينِ يُشكّلانِ زاويةً قائمة. وهذه الصُّوَرُ مفيدةٌ جداً لأغراضِ التعرّفِ، لأنها تغطّي منطقةً عريضةً جداً مِن السماء، وتحدّدُ مواقعَ الأجسامِ التي يزيدُ سطوعُها عن حدٍّ معيّن. وأكثرُ ما يُلفتُنا في هذا الشكلِ هو المجرّةُ المفهرسَةُ تحت رقم NGC 3079.

و(أ)، في الشكل ٦,١٦، هي خارطةٌ راديويةٌ عُمِلَتْ في عام ١٩٨٦، مِن قِبَلِ كوندوف وبرودريك، على صحنٍ ذي ٣٠٠ قدم في NRAO، والذي أظهرَ خطوطَ المحيطاتِ الراديويةِ في تلك المنطقة. ونلاحظُ بأنَّ المصدرَ 58+ O 958 هو، في الحقيقةِ، القرينُ الأضعفُ لمصدرٍ أقوى على مقربةٍ مِن المجرّةِ المعروفةِ برقم NGC 3079. وقد عُرِفَ وفُهْرِسَ هذا المصدرُ الراديويُّ الأقوىٰ مِن قَبْلُ تحت رقم $_4C_{55.19}$. وعلى أيةِ حالٍ، فلقد كانت هذه قصّةً عن العامِ ١٩٨٦، فما الذي كان عليه الوضعُ قبلَ ذلك بعقدٍ مِن الزمان؟

كان بوركاس، عامَ ١٩٧٦، عارفاً بوجودِ المصدرِ الراديويِّ $_4C$. ولتعيينِ موقعِ المصدرِ جودريل 58+ O 958، قام بوركاسُ بالنظرِ شمالاً، ثمَّ وجدَه أخيراً. ولو كانَ ذهبَ جنوباً فلم يكُنْ ليجدَه، لا ولا كان ليجدَه بالطبعِ لو كان قد توقّفَ عن الكشفِ عن المصدر الأقوى $_4C$. ولقد كانت تلك مصادفةً سعيدة!

ثمَّ إنَّ والش علّقَ على القربِ النسبيِّ للمصدرينِ الراديويّيْنِ أيضاً، وعلى المصادفةِ

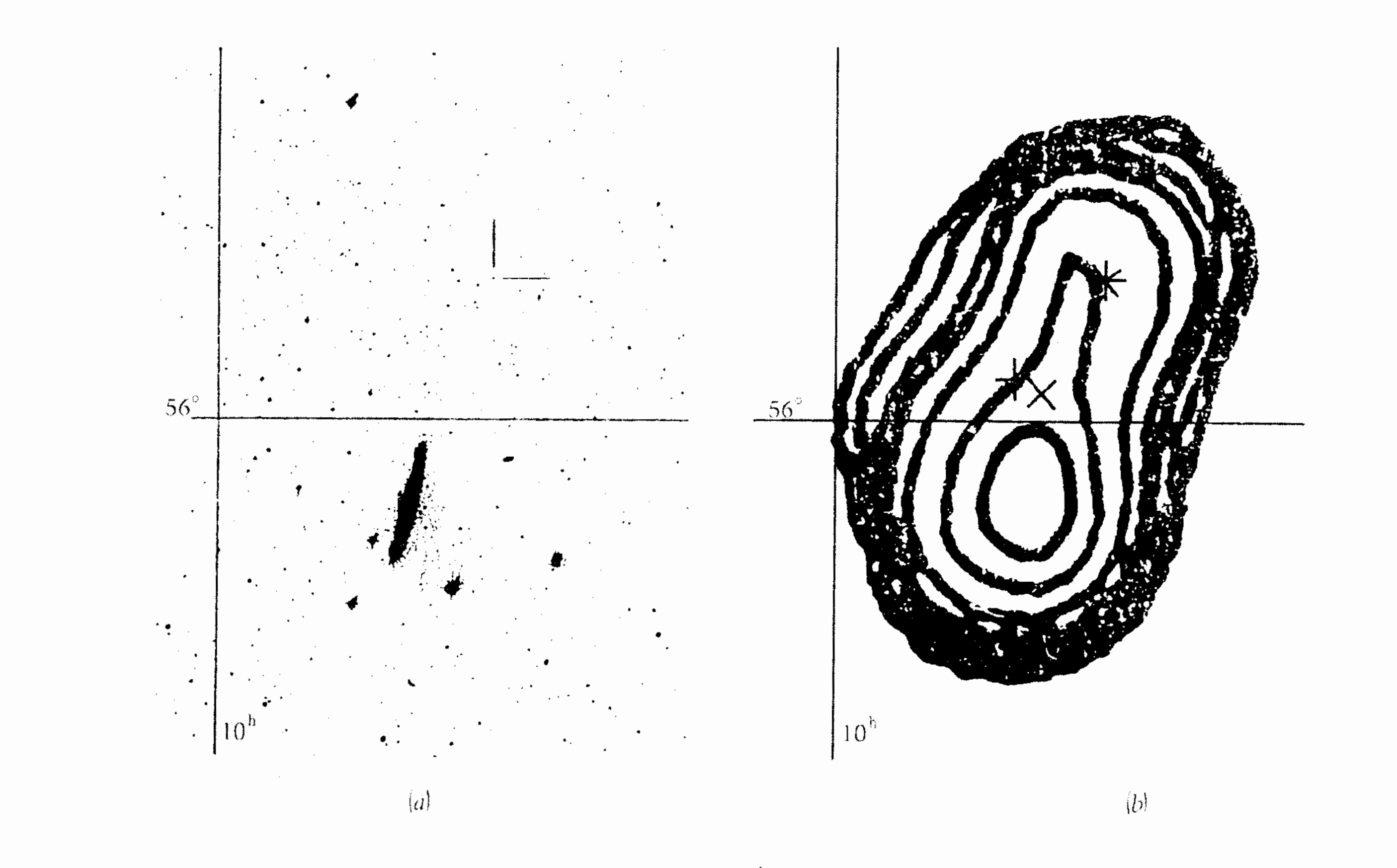


الشكل ٦,١٥ : كان أوّلُ كشفٍ عن المصدرِ الراديوِّ المُشارِ إليه بالرمزِ 56+ 958 O مِن خلالِ رسومِ المسحِ البيانيِّ التي تظهرُ في هذا الشكل.

الغريبةِ في عثورهم على المصدرِ الأضعفِ وعدمِ عثورهم على المصدرِ الأقوىٰ!

وتلا ذلك برنامجٌ للتعرّفِ الفعليّ. كان كلٌّ مِن آن كوهن مِن جودريل بانك، وميغ أوري في NRAO، يعملانِ بصورةٍ منفصلةٍ على ذلك، وبمجيءِ عام ١٩٧٧ توصّلَ كلاهُما إلى جِرْمٍ محتملٍ أزرق يشبهُ النجمَ، باعتباره تَعَرُّفاً مُحتمَلاً. وبالإضافةِ إلى ذلك فقد بدا بأنَّ ذلكَ الجِرمَ هو مصدرٌ مزدوج. ولكنَّ انفصالَه الزاويّ، مِن الموقعِ الراديويِّ الذي أعطاهُ بوركاس، كان يبلغُ نحواً مِن ١٧ ثانيةً قوسيةً وهو ما لَمْ يَعِدْ بتعرّفٍ محتمل. ولكنْ، وعلى الرغمِ مِن ذلك، فإنَّ جِرْماً أزرقَ يشبهُ النجمَ يمكنُ أن يكونَ كوازاراً. ولقد قرَّرَ والش وكارسويل أن يرصُداهُ، بعنايةٍ أكبر، في مِرْقابٍ ذي ٢,١ المتر، في مرصدِ كيت بيك الوطنيّ. وتمّتْ فهرسةُ المصدرِ المزدوجِ تحت رقم 561+ 957 O، وعندما أخذوا أطيافَ المصدريْنِ (انظرْ الشكل ٦,١٧)، **فلقد وجدوهما متشابهيْنِ للغاية**، وإلى درجةٍ ظنّوا معها أنهم أخذوا طيفَ الجسمِ ذاتِه مرّتيْن!

ولكنَّ إعادةَ الفحصِ المدقّقةَ أظهرَتْ بأنهم لم يُخطئوا، لقد كانوا ينظرونَ، في حقيقةِ الأمرِ، إلى كوازاريْنِ اثنينِ قريبيْنِ الواحد مِن الآخرِ، وبأطيافٍ متطابقة، ومَيَلاناتٍ



الشكل ٦,١٦: نرىٰ في (أ) المصدرَ الراديويّ O 957 +561، وهو معلَّمٌ في صورةِ بالومار سكاي سرفي البصريةِ بخطّيْنِ متعامديْن. لاحِظِ المجرةَ البارزةَ القريبة NGC 3079. أما في (ب) فنرىٰ جزءاً مِن الأطلسِ (الراديويّ) لكوندون وبرودَريك، وعلىٰ المقياسِ ذاتِه الذي في (أ). وأمّا موقعُ O 957 +561 فهو معلَّمٌ بـ (※). وتصلُ خطوطُ حدودِ الراديو أوجَها حولَ المجرة NGC 3079. ويظهرُ موقعُ جودريل بانك للمصدرِ الراديويّ O 958 +56 مؤشراً عليه بعلامة (+). وعلىٰ مقربةٍ منه يقعُ المصدرُ الراديويُّ الأقوىٰ 4 C 55.19 الذي لاحظه ريتشارد بوركاس مِن قبل، مؤشراً عليه بعلامة (×). لاحظ أنَّ موقعَ جودريل بانك للمصدرِ الراديويِّ الجديد يقعُ حوالىٰ وسطِ المسافةِ ما بين الموقعِ الحقيقيّ (※) ومجرّةِ NGC.

للأحمرِ واحدةٍ مِن ١,٤. وكانت الصورتانِ مفصولتيْنِ بزاويةٍ صغيرةٍ تبلغُ ٦ ثوانٍ قوسية. كان ذلك في آذار، من عام ١٩٧٩. وتطلّبَ الأمرُ أرصاداً إضافيةً، لتأكيد هذا الاكتشافِ البارز. وكاختراقٍ آخرَ محظوظٍ، فلقد لاقوا الفلكيَّ راي وايمان الذي جاء إلى كيت بيك لإجراءِ رَصْدٍ آخَرَ على مِرقاب ستيوارد ذي ال ٢,٣ المتر.

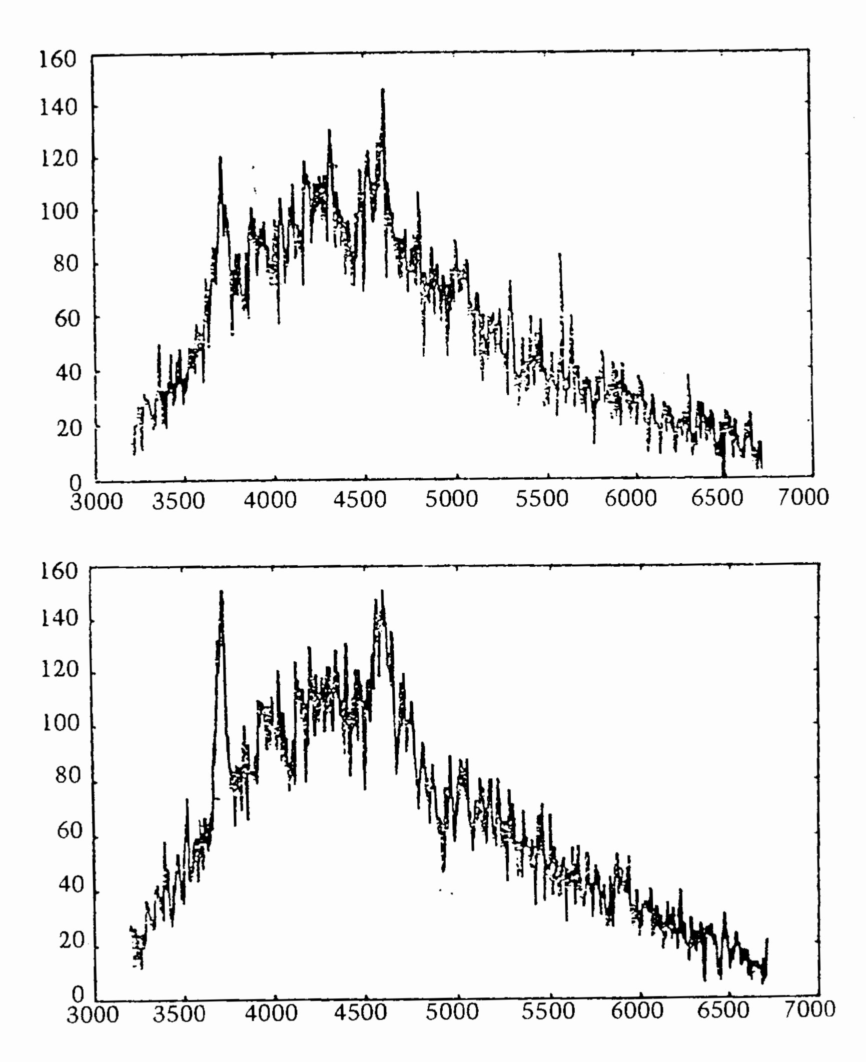
وما الذي جاءَ بوايمانَ إلى هناك؟ لقد تمَّ إخبارُه خلالَ مهلةٍ قصيرةٍ أنَّ بإمكانه أن يبيتَ ليلةً واحدةً مع هذا المِرقاب. ولمّا كانت الليالي في المَراقِبِ الكبيرةِ بضاعةً ثمينةً للراصدين، فلقد أسرعَ وايمانُ لاقتناصِ هذه الليلةِ الإضافية. وتصادفَ أيضاً أنه كان يحملُ بحوثاً عن الكوازاراتِ في إزاحاتٍ للأحمرِ في مدىً يتضمّنُ إزاحةً للأحمرِ مِن ١,٤. وهكذا وافقَ وايمانُ على أن يُخصّصَ تلك الليلةَ لذلك الموضوعِ الجديد. وكانت أحوالُ المراقبةِ مِثالية. أكّدَتْ مُشاهَداتُ وايمانَ النتائجَ السابقةَ التي خرجَ بها والش وكارسويل. ولقد بلغَ التشابهُ بين الجِرميْنِ حدّاً مِن الغرابةِ بحيثُ تجاسَرَ ثلاثتُهم على التفكيرِ، للوهلةِ الأولى، بأنهم قد شاهدوا **عدسةً ناجمةً عن الجاذبية gravitational lense**.

ويتذكرُ والش، وهو يتحدثُ بمِزاجٍ أرَقَّ مِن الأوّل، بأنه عقدَ رهاناً مع فلكيٍّ آخرَ، وهو ديريك وِلس الذي كان خبيراً في أزواجِ الكوازاراتِ القريبةِ مِن بعضها البعض. وكان ذلكَ قبلَ إجراءِ البحثِ الأخيرِ على 957 O +561. وعندما سألَ والشُ زميلَه وِلس عمّا يظنّه في الأجرامِ النجميةِ الزرقاء أجابه قائلاً: «إنها نجومٌ»، لأنَّ ذلك كان هو الاحتمالَ الأقوى. وهذا هو السببُ في قيامِ والش بذلك الرِّهان: إنه سوف يدفعُ لِولس ٢٥ سنتاً إذا ما تأكّدَ بأنّ هذينِ الجِرميْنِ هما نجمانِ حقّاً، وأمّا إذا تبيَّنَ بأنهما زوجانِ[1] من الكوازاراتِ، فإنَّ وِلس سيدفعُ لوالش دولاراً واحداً. وقد ظنَّ والش، في هذه المرحلةِ، بأنَّ مِن الحمقِ البالغِ أن يقولَ بأنَّ على والش أن يدفعَ مائةَ دولارٍ لو تبيَّنَ أنَّ الكوازاراتِ تملكُ الإزاحةَ الحمراءَ ذاتَها، وهو أمرٌ أقلُّ احتمالاً!

وبعد أن أكّدَت الأطيافُ أنَّ الأجرامَ الزرقاءَ هي كوازاراتٌ حقّاً، فلقد دَفَعَ رهانَه كلَّهُ بدولارٍ فضيٍّ واحد. وهكذا، فعندما تساءلَ أبناؤُه متشككينَ عن مدى فائدةِ الجاذبيةِ له، أجابَهم: «حسناً، لقد ربحتُ أموالاً مِن ذلك».

---

(١) الزوج: خِلافُ الفرد. وكلُّ شيئينِ اقترنَ أحدُهما بالآخر فهما زوجان. د.س



الشكل ٦,١٧ : إنّ الخطوطَ الطيفيةَ للمصدرَين A و B، في 561+ 957 O، متشابهةٌ جدّاً.

تفاصيلُ الصُّوَر

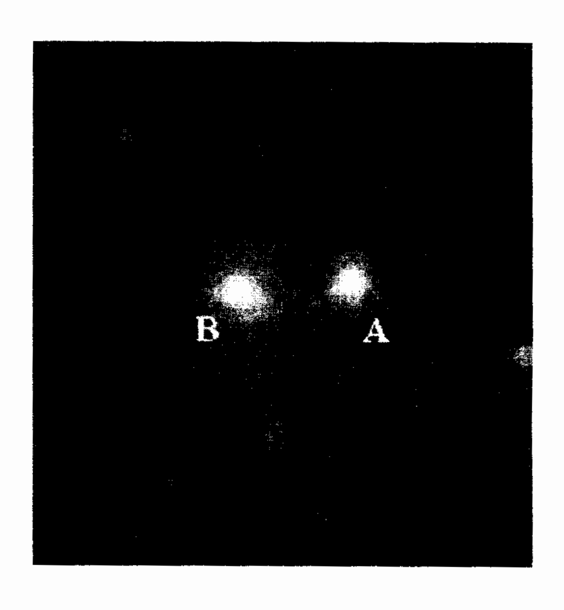
أُتبِـعَ اكتشافُ الكوازارِ المُعْدَسِ جاذبياً، والمُشارِ إليه أعلاه، بفحوصٍ عديدةٍ عن الأوجهِ المختلفةِ لمنظومةِ العدْسِ هذه، ولسوف نقومُ بإلقاءِ الضوءِ على جوانبَ عديدةٍ منها.

يُظهِرُ لنا الشكلُ ٦,١٨ ، على اليسارِ، الصورةَ البصريةَ A و B للكوازارِ «المزدَوِج». لقد أظهَرتْ هذه تشابهاً بصرياً كبيراً، اللهمَّ إلاّ بروزاً صغيراً في الصورةِ اليسرى، B.

وبفضلِ تقنياتِ تصنيع الصورةِ مِن طريقِ الحاسبِ، فلقد أمكنَ التخلصُ مِن القسم «الزائدِ» في B، لجعلِ الصورتيْنِ متماثلتيْن. ولكنْ، ما سببُ وجودِ النتوءِ الزائد؟

لقد دلَّ المزيدُ مِن البحوثِ على أنَّ البروزَ الزائدَ إنَّما هو مجرَّةٌ، وبإزاحةٍ حمراءَ تبلغُ ٠,٣٦، وقد بيَّنّا في الفصلِ السابعِ أنَّ الإزاحةَ الحمراءَ هي مقياسٌ لبُعدِ المجرّةِ عنا. واعتماداً على قانونِ هابل، الذي نصفهُ الآنَ، يمكنُنا أن نأخذَ بُعْدَ جِرْمٍ ما خارجَ المجرّة على أنه يساوي إزاحتَه الحمراءَ مضروبةً في مسافةٍ تبلغُ حوالىٰ ١٠ بلايينِ سنةٍ ضوئية[١]. وهكذا فلقد دلّت قيمةُ الإزاحةِ الحمراءِ التي تبلغُ ١,٤، لصُوَرِ الكوازارِ A، B، على أنَّ الكوازارَ يقعُ على مسافةِ ١٤ بليونَ سنةٍ ضوئيةٍ تقريباً عنا، بينما أنَّ المجرّةَ ذاتَ البروزِ هي أقربُ بكثير، إذ تبعدُ ٣,٦ السنةِ الضوئية عنا فقط.

ولذا فإنَّ هذه المجرّةَ تقعُ على الطريقِ إلى الكوازار، رغم أنها تبعدُ قليلاً عن خطِّ نظرِنا المباشرِ لها. ولقد أثارَ هذا احتمالاً مُثيراً في أنها قد تكونُ، في واقعِ الحال، مجرّةَ عَدْسٍ lensing galaxy. ويُعطينا التشكيلُ النظريُّ لمنظومةِ الصورةِ سنداً لهذا الحَدْس. ثمَّ إنَّ تفاصيلَ أخرى لبِنيةِ المصدرِ الراديويةِ قد احتاجت إلى عَدْسٍ **إضافيٍ** مِن قِبَلِ عنقودٍ مِن المجرّاتِ ذات العَدْس.

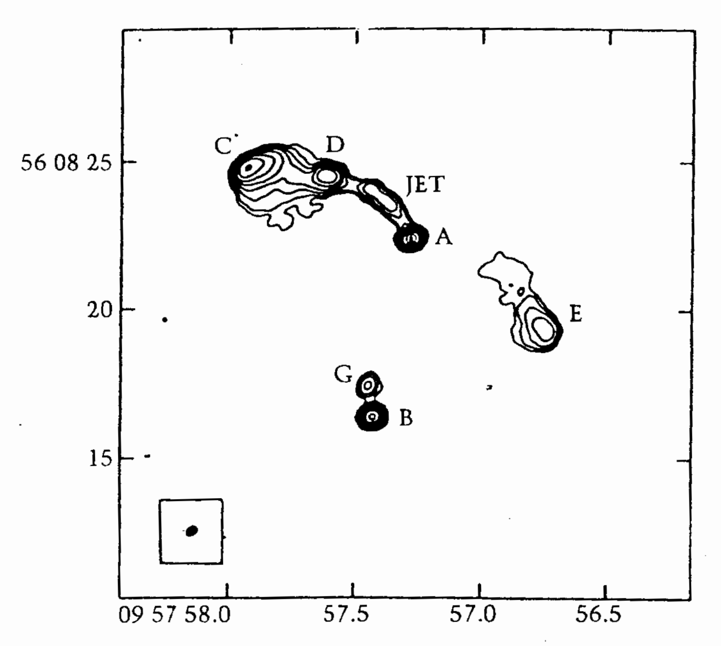


الشكل ٦,١٨: صورةٌ التقطَها مِرْقابُ هابل الفضائيُّ للكوازار O 957 +561 A, B، والذي يُعتَقَدُ أنه مِثالٌ علىٰ العَدْسِ الجاذبيّ.

(١) إنّ معادلةَ الإزاحةِ الحمراءِ ـ المسافةَ، المضبوطةَ، وكما سوف نرىٰ في الفصلِ السابعِ، تعتمدُ علىٰ قيمةِ هابل والنموذجِ الكونيِّ الذي يصِفُ العالَم.

وَتَظْهَرُ البِنيةُ الراديويةُ في الشكلِ ٦،١٩. ونرى هنا، مرّةً أخرىٰ تشابه الصورتيْنِ في A و B. وتبدو الفصوصُ الراديويةُ في هذه المواقعِ متماثلةً. إلاَّ أنَّ هناك مظاهرَ إضافيةً في الشكلِ لا تتطابقُ صورةً بصورة. ولتفسيرِ بعضِ هذه المظاهرِ الإضافيةِ فإننا نحتاجُ إلى عدسةٍ ثانيةٍ للعنقود Cluster. ولسوف يشملُ عنقودٌ كهذا المجرّةَ العادِسَةَ ذاتَها.

ويُرينا الشكلُ ٦،٢٠ رسماً تخطيطياً نظرياً لأشعةِ ضوءِ الكوازارِ O 957 +561. لاحِظْ أنَّ الصورتيْنِ A و B يشاهدُهما الراصدُ على الأرضِ، مِن خلالِ مساريْنِ ضوئييْنِ مِن المصدرِ الأصليّ. وهكذا فإنّه **لا A ولا B تقعانِ على الموقعِ الحقيقيِّ للمصدر**، بل إنَّ كليهما مجرّدُ وهم. وعلى الرغمِ مِن ذلكَ، فإنَّ التشكيلَ الحسابيَّ لمنظومةِ العدسةِ يمكنُ أن يُستخدَمَ لتخمينِ التوهّجِ النسبيِّ relative brightness للصُوَرِ المشاهَدةِ. فالصورةُ A، مثلاً، هي أكثرُ توهجاً مِن الصورةِ B برُبعِ مرّةٍ، بصرياً وراديوياً، وهو ما



الشكل ٦،١٩ : خريطةٌ راديويةٌ للكوازار O 957 +561، وقد التقطَها مِرقاب «النظام فائق الكِبَر» Very Large Array، علىٰ طولِ موجيٍّ مِن ٦ سنتمتراتٍ. وتظهرُ المكوِّناتُ A و B متطابقةً مع مكوناتها البصرية. وهناك مكوِّناتٌ أخرىٰ، وهي C و D و E، وترتبطُ بالمكونِ A. إنَّ المحورَ العموديَّ يمثّلُ المَيْلَ الزاويَّ declination[1]، بينما يمثّلُ المحورُ الأفقيُّ الصعودَ الصحيح.

---

(١) المَيْلُ الزاويُّ: هو البعدُ الزاويُّ، لجِرْمٍ ما، شمالاً أو جنوباً مِن خطِّ الاستواءِ السماويّ. د.س

Image A

Source

Galaxy causing
bending of light rays

Earth

Image B

الشكل ٦,٢٠ : رسمٌ تخطيطيٌّ لأشعةِ العَدْسِ الجاذبيِّ للكوازارِ المزدوجِ O 957 +561 A, B.

يعني بأنّ الأشعةَ التي تكوِّنُ الصورةَ A تأخذُ وتركّزُ جزءاً أكبرَ مِن الضوءِ بِقَدْرِ ذلك، مِن المصدرِ الأصليّ، مِن الأشعةِ التي تكوّنُ الصورةَ B. كما يتوجّبُ أن يتوافقَ الأنموذجُ الحسابيُّ أيضاً مع الانفصالِ الزاويِّ الملاحَظِ للصّوَرِ المرصودة، وهو ما يعادلُ في هذه الحالةِ ستَّ ثوانٍ قوسية.

ولكنَّ هناك فحصاً حاسماً يمكنُ أن ينبئَنا، وبوضوحٍ تامٍّ، إنْ كانت عدسةٌ للجاذبيةِ كهذه هي المسؤولةَ فعلاً عمّا نراه، أو إن كانت الصورتانِ تمثّلانِ مصدريْنِ اثنينِ منفصليْنِ مِن دونِ شكّ، واللّتانِ تصادَفَ أن تكونَ لهما أطيافٌ وأشكالٌ متشابهةٌ جداً. ويُعرَفُ هذا الفحصُ بفحصِ التأخرِ الزمنيّ، وهو يعملُ كما يأتي.

افرضْ أنّ المصدرَ لا يمتلكُ توهجاً ثابتاً، ولكنه يمتلكُ ارتفاعاتٍ وانخفاضاتٍ غيرَ منتظمةٍ في توهّجه، لو تَمَّتْ مراقبتُه لفترةٍ أطول. إنَّ الارتفاعاتِ والانخفاضاتِ ذاتَها سوف تُلاحَظُ في A و B، ولكنْ ليس في الوقتِ ذاته، لأنَّ مساراتِ الضوءِ التي تكوِّنُ الصورتيْنِ ليست بالطولِ نفسِه. ولمّا كان الضوءُ سيستغرقُ فترتيْنِ زمنيتينِ مختلفتينِ لقطعِ المسافةِ، فإننا لن نرى A و B في الوقتِ ذاتِه. ولذا فإنَّ الارتفاعاتِ والانخفاضاتِ في المصدرِ سوف تُرىٰ في A و B في أوقاتٍ مختلفة.

ولذا فإننا لسوف نحاولُ، في فحصِ التأخّرِ الزمنيِّ، أن نُوافِقَ ما بينَ تقلّباتِ التوهّجِ في الصُّوَرِ A و B، مِن خلالِ السماحِ بتأخُّرٍ زمنيٍّ مناسب. وهكذا، فلو توقَّع المِثالُ أنَّ

المسارَ الذي يشكِّلُ الصورةَ B هو **أطولُ** بسنةٍ ضوئيةٍ واحدةٍ مِمَّا هو عليه في الصورةِ A، فلسوف يتكررُ أنموذجُ التقلّباتِ الذي يعودُ لِـ A في B، **بعدَ سنةٍ واحدة**.

ولقد كانت الفحوصاتُ التي أُجريتْ للبحثِ عن تأخّرٍ كهذا للكوازارِ 561+ 957 O غيرَ حاسمةٍ حتىٰ الآن. وتتوقعُ النماذجُ النظريةُ تأخراً زمنياً يبلغُ سنةً ورُبعَ السنةِ تقريباً، وحسبَ المظاهرِ الهندسيةِ للأنموذج. ومنَ الواضحِ أنَّ هناك حاجةً إلى المزيدِ مِن مراقبةِ المصدرِ حتى يتمَّ إقناعُ المتشككين.

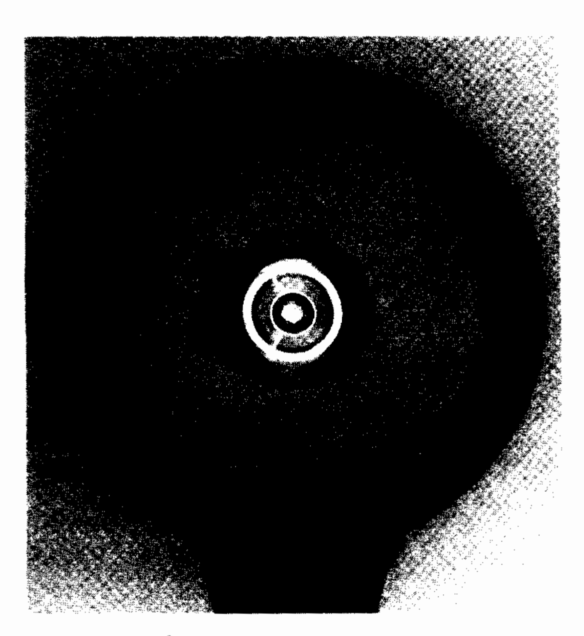
وبالاختصار، فإنَّ أولَ زوجيْنِ مِن الصُّوَرِ، التي وُجِدَتْ كأمثلةٍ على العَدْسِ الجاذبيِّ لمصدرٍ منفردٍ، شغلا العلماءَ لِما ينوفُ على العقديْنِ مِن الزمان.

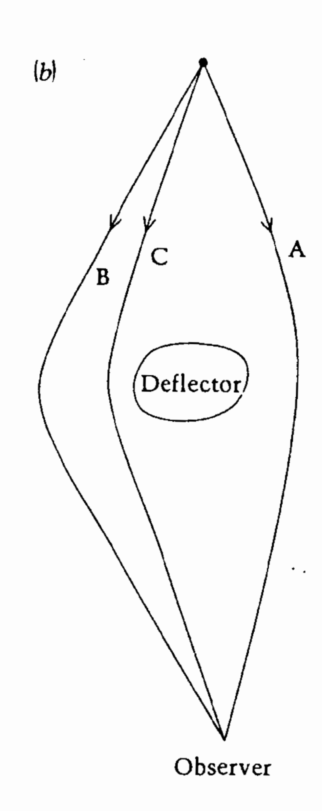
مزيدٌ مِن عَدَساتِ الجاذبية Gravitational lensing

لقد ألهبَ اكتشافُ الكوازارِ 561+ 957 O، والاحتمالُ المتزايدُ في أنه قد يكشفُ عن وجودِ عدسةٍ للجاذبية، ألهبَ جهودَ الراصدينَ للبحثِ عن المزيدِ مِن عدساتِ للجاذبية. وقبل أنْ ننظرَ في هذه العدسات، فلننظرْ فيما يتوقعُ العلماءُ أن يجدوه، على أساسِ نظريةِ آينشتاينَ العامةِ للنسبية.

ويُظهِرُ الشكلُ ٦,٢١ عدسةً متناظرةً جداً، مبنيةً على أساسِ حلِّ شوارزجايلد. ونملكُ هنا مصدراً يقعُ على المحورِ الواصلِ ما بين الراصدِ ومركزِ الكتلةِ الكرويةِ الجاذبة. وفي هذه الحالةِ، فإنّ الأشعةَ المبتعَثَةَ مِن المصدرِ إلى المحورِ، في زاويةٍ معيّنةٍ، يمكن أن تولِّدَ أيّاً مِن الأعدادِ اللانهائيةِ للاتجاهات، وكلُّها يقعُ على مخروطٍ يقعُ المصدرُ على رأسه. ولسوف تُحنىٰ هي أيضاً، وبصورةٍ مشابهةٍ، مِن قِبَلِ الكتلةِ الجاذبة، وتصلُ إلى الراصدِ على طول الاتجاهاتِ التي تقعُ على مخروطٍ آخرَ. وهكذا فلسوف **يرى الراصدُ عدداً لانهائياً مِن الصُّوَر، وكلُّها يقعُ على حلقةٍ تُعرَفُ بحلقةِ آينشتاينَ**. ولا يوجدُ في الطبيعةِ، واقعاً، مثلُ هذا التناظرِ التامّ. وهكذا فإننا لا نتوقعُ أن نرى حلقةَ آينشتاينَ تامّةً، ولكننا سنرى صُوَراً قليلةً «تتجزّأُ» الحلقةُ إليها. ونرى في الشكل ٦,٢١ (أ) مخططاً نموذجياً يؤدي إلى ثلاثِ صُوَر.

وتوحي النظرياتُ الحسابيةُ العامّةُ التي تخصُّ العَدْسَ الجاذبيَّ، والتي وَضَعَتْها مصادرُ فلكيةٌ نموذجيةٌ، بأننا يجب أن نرى، في العادةِ، عدداً **وَتْرِياً** للصُّوَر. ولكنْ ليست هذهِ الصورُ كلُّها ذاتَ توهجٍ واحد، وكما نرى في حالةِ الكوازار 561+ 957 O. وهكذا



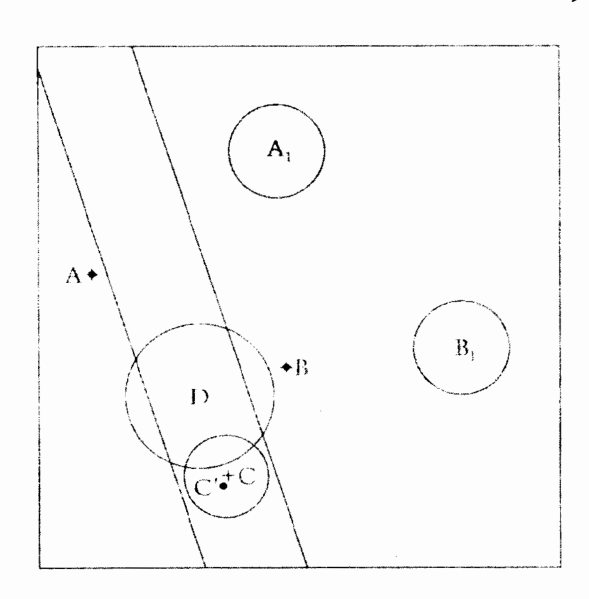


الشكل ٦,٢١ : نرىٰ في (أ) حلقةً آينشتاينيةً تتكونُ مِن عدسٍ لمصدرٍ يقعُ علىٰ المحورِ الواصلِ ما بين الراصدِ ومركزِ الكتلةِ الكرويةِ العادِسة. ويتمُّ الحصولُ عليها باستخدامِ مُحاكٍ للعدسة. أمَّا في (ب) فإننا نرىٰ مخططاً لثلاثِ صُوَرٍ في الحالةِ العامة، لعدسةٍ غيرِ متناظرة. وهناك ثلاثةُ سُبُلٍ ممكنةٍ تسلكها أشعةُ الضوءِ مِن المصدرِ إلىٰ المراقب، وهي A و B و C. وفي هذه الحالةِ، فإذا كانت الصورةُ الثالثةُ باهتةً جداً، فإننا لن نُشاهدَ إلاَّ صورتيْنِ اثنتين.

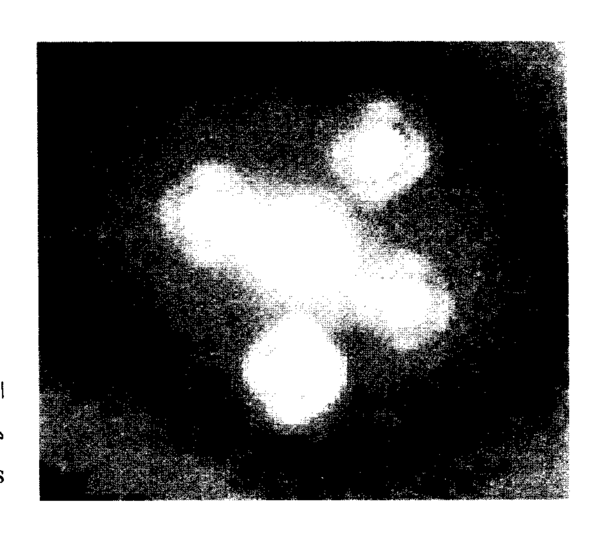
فقد يحدثُ أننا نرى صورتيْنِ وحسب مِن أصلِ ثلاثِ صور، لأنَّ الصورةَ الثالثةَ قد تَصادَفَ أنها باهتةٌ جداً. وفي واقعِ الحالِ، فإننا نرى حالاتٍ أكثرَ للعددِ الشفعيِّ مِن الصور (اثنين أو أربعة)، مِن تلك التي هي لعددٍ وتريّ.

ويُرينا الشكلانِ ٦,٢٢ و٦,٢٣ مثاليْنِ على عَدَساتِ الجاذبيةِ المُرَشَّحَة، وتحتوي إحداهُما على ثلاثِ صورٍ، والأخرى على أربع، ولم يتمَّ التعرُّفُ على المجرةِ العادِسَةِ في أيٍّ مِن الحالتَيْنِ، ولكنَّ العلماءَ عملوا «نماذجَ» لهذه الحالاتِ، واقترحوا أبعاداً ممكنةً لمجرةِ العدسة lens galaxy وكتلتِها في كلِّ حالة. ويبلغُ الانفصالُ الزاويُّ الأقصى بين الصورِ في الحالة الثلاثيةِ ٣,٨ الثانيةِ القوسية.

ويحدثُ في بعضِ الحالاتِ أنْ لا نرى إلاَّ صورةً **واحدةً** لا غير. وقد يعني هذا أنَّ معظمَ الضوءِ القادمِ مِن المصدرِ نحو المراقبِ يتركزُ في صورةٍ واحدةٍ فقط، وأمّا الصُّوَرُ



الشكل ٦,٢٢: لقد اعتُبِرَ المصدرُ الراديويُّ 112+ 2016 مُرشّحاً عَدَسِيّاً جيداً يتألفُ مِن ثلاثِ صورٍ هي A و B و C. والنظائرُ البصريةُ لِـ A1 و B هي مصادرُ بصريةٌ شبهُ نجميةٍ ذاتُ إزاحةٍ حمراءَ مِن حوالىٰ ٣,٢٧، وأمّا A فهي أكثرُ توهجاً مِن B بِـ ٣٠٪. وقد اكتُشِفَت الصورةُ C^1 بعدئذٍ، وهي قريبةٌ جداً مِن C، والتي قد تكونُ مجرّةً بيضوية. والمصدرُ البصريُّ $C + C^1$ هو أبهتُ مِن B بما يقربُ مِن ٤ مرّات. والمصادرُ A1 و B1 ليست لها أيةُ علاقةٍ بالكوازارِ الأصليّ. أمّا D فهي مجرّةٌ علىٰ الطريق، وبإزاحةٍ حمراء تقربُ مِن الواحد، وقد تكونُ مسؤولةً عن ظاهرةِ العَدْس. وتوجدُ نماذجُ لهذه المنظومةِ، إلاَّ أن طبيعتها لم تُفهَمْ كلُّها بعدُ.



الشكل ٦,٢٣ : صورةٌ التقطَها مِرْقابُ هابل الفضائيُّ لصليبِ آينشتاين Einestein cross.

الباقيةُ فتكونُ باهتةً جداً. وعندها قد تكونُ الصورةُ الواحدةُ المرئيةُ ساطعةً بصورةٍ غيرِ اعتياديةٍ بسبب تركيزِ الضوء.

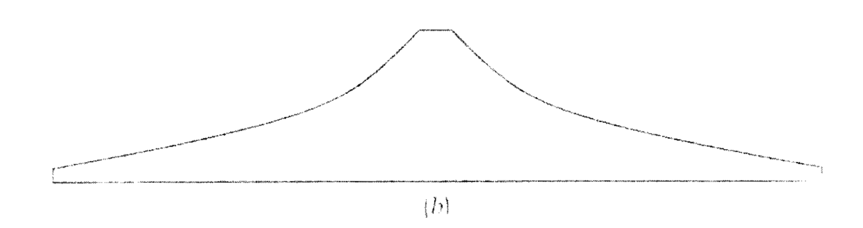
وثَمَّةَ احتمالٌ آخَرُ يتمثّلُ في أنَّ الكتلةَ العادِسَةَ غيرُ منظورةٍ بالمرّة، لكونها ثقباً أسود عظيماً، أو كتلةً هائلةً مِن المادّةِ المعتمة dark matter، مِن النوعِ الذي يتطلّبُه علماءُ الكون (انظرْ الفصلَ السابع).

ولا يزيدُ العَدْسُ الجاذبيُّ مِن سطوعِ الصورةِ بالطريقةِ المذكورةِ وحَسْب، بل إنه يمكنُه أن يُكبّرَ الجسمَ أيضاً، وكما تفعلُ العدسةُ المكبرة، وقد يكونُ التكبيرُ صغيراً أو كبيراً اعتماداً على الترتيبِ الهندسيِّ للمصدرِ، والعدسةِ، والراصد.

ويُرينا الشكلُ ٦,٢٤ : **مُحاكياً**، مصنوعاً في المختبرِ، لعدسةِ جاذبيةٍ لشوارزجايلد، وهي تُصنَعُ مِن مادّةٍ شفافة، وبصورةٍ جانبيةٍ نصفِ قطريةٍ نراها في الشكل ٦,٢٤(ب). ويقلُّ سمكُ العدسةِ كثيراً، في هذه الحالةِ، كلَّما ابتعدنا عن المركزِ، ثم يصبحُ مُسْتَدِقَّ الحافات. وتنحني أشعةُ الضوءِ المارّةُ عَبْرَها بفعلِ الانكسارِ (وكأيِّ عدسةٍ زجاجيةٍ نموذجية). ولكنْ، وبسببِ هذا الشكلِ، فإنَّ فِعلَ الحَنْيِ هو بالضبطِ ما سوف تسبّبُه جاذبيةُ كتلةٍ كرويةٍ في مركزِها.

وإنَّ مِن المفيدِ أن نرى كيف تتكوّنُ حلقةُ آينشتاينَ، في هذا المُحاكي فقط، عندما يكونُ تراصُفُ المصدرِ ـ الراصدِ متناظراً جدّاً. إنَّ اختلالَ التناظرِ يؤدي إلى تجزُّؤِ الحلقةِ إلى صورتيْنِ اثنتين.





الشكل ٦,٢٤ : (أ) مُحاكٍ مصنوعٌ مختبرياً لعدسةِ الجاذبيةِ لشوارزجايلد. (ب) صورةٌ شعاعيةٌ جانبيةٌ لسطحِ العدسةِ المنحني من (أ).

أقواسٌ وحلقات

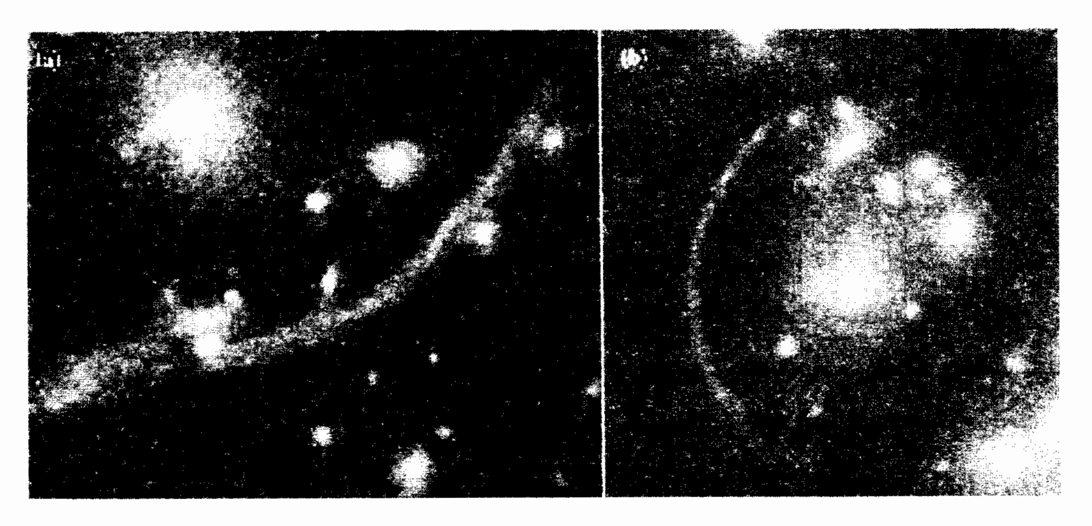
يرينا الشكلُ ٦,٢٥ مَثَلَيْنِ اثنينِ لصُوَرٍ لمجرّاتٍ أشبهَ بالقوس! هل إنها حلقاتٌ آينشتاينيةٌ تجزأتْ جُزئياً؟ إنَّ مِن المغري أن نُفكّرَ على هذا النحو، ولكنَّ ذلك قد لا يكونُ صحيحاً. فلننظرْ في تاريخها باختصار.

لقد أعطتْنا دراساتُنا للعناقيد، في أواخرِ القرنِ العشرين، دلائلَ تشيرُ إلى وجودِ تركيباتٍ شبهِ قوسيةٍ متوسعةٍ، إلاّ أنَّ نوعيةَ المعطياتِ لم تسمحْ باستنتاجاتٍ قاطعة. ولكن صارَ وجودُ تركيباتٍ شبهِ قوسيةٍ، في أواسطِ الثمانيناتِ مِن القرنِ ذاتِه، أمراً لا يمكنُ تجاهلُه، رغمَ أنه لم يتمَّ البحثُ عنها على نحوٍ بيِّنٍ. وصار وجودُ الأقواسِ في العناقيد، في خلالِ فترةِ ١٩٨٦ ـ ١٩٨٧، أمراً ثابتاً، فلقد أعلنَ كلٌّ مِن روجر ليندز وڤاهي بتروسيان مِن الولاياتِ المتحدةِ الأمريكية، وجماعة تولوز التي تتكوّنُ مِن سوكيل، وميليير، وفورت، وبيكات بصورةٍ مستقلةٍ، عن عثورهم على أقواسٍ في العناقيد.

ويقعُ القوسُ الذي يظهرُ في الشكل ٦,٢٥(أ) في عنقود آبيل ـ ٣٧٠ Abell cluster 370، ويبلغُ طولُه ٢١ ثانيةً قوسية. ومعدّلُ سمكهِ هو ثانيتانِ قوسيتان، بينما يبلغُ نصفُ قطرِه ١٥ ثانيةً قوسية. وهذا القوسُ ليس متوهجاً بصورةٍ منتظمة، وهو يبدو مليئاً بالعُقَد. وقد قِيستْ إزاحتُه الحمراءُ، فوُجِدَ أنها تبلغُ ٠,٧٢٤. وباستخدام العلاقةِ ما بينَ المسافةِ والإزاحةِ الحمراءِ (انظرْ الفصل ٧)، يتوجّبُ أن يبلغَ بُعْدُ القوسِ عنّا نحواً مِن سبعةِ بلايين مِن السنين الضوئية. ولمّا كان العنقودُ ذاتُه أقربَ إلينا مِن ذلك بكثيرٍ، فإنَّ القوسَ لا يعودُ له.

وما عساهُ أن يكونَ مصدرُ هذا القوس؟ قامَ العلماءُ بتقديم تفسيراتٍ مختلفةٍ عديدة، مستخدمينَ عملياتٍ فلكيةً فيزيائيةً مختلفة. ولكنها لم تكنْ ذاتَ جدوى. ولقد فازت، في نهايةِ المطاف، فكرةُ العَدْسِ الجاذبيّ. **إننا لا نرى قوساً دائرياً حقيقياً في الشكل ٦,٢٥. ولكننا نرى صورةً مشوَّهةً لمجرّةٍ تبلغُ إزاحتُها الحمراءُ ٠,٧٢٤، وهي ناجمةٌ عن عنقودٍ أماميّ مِن المجرات.**

وهو أشبَهُ شيءٍ بالصورةِ التي نراها إذا ما وقفْنا أمامَ مرآةٍ منحنيةٍ، أو صورةِ جسم متمدّدٍ، عند النظرِ إليها مِن خلال العدسة. ولقد بيَّنَ لنا الآنَ أنموذجٌ للقوسِ، في آبيل ـ ٣٧٠، كيف تتكوَّنُ مِثلُ هذه الصُّورِ المشوهةِ بوساطة العَدْسِ الجاذبيّ. وقد وُجِدَتْ



الشكل ٦,٢٥ : (أ) القوسُ في عنقودِ آبيل ـ ٣٧٠. (ب) القوسُ في العنقود Cl 2244.

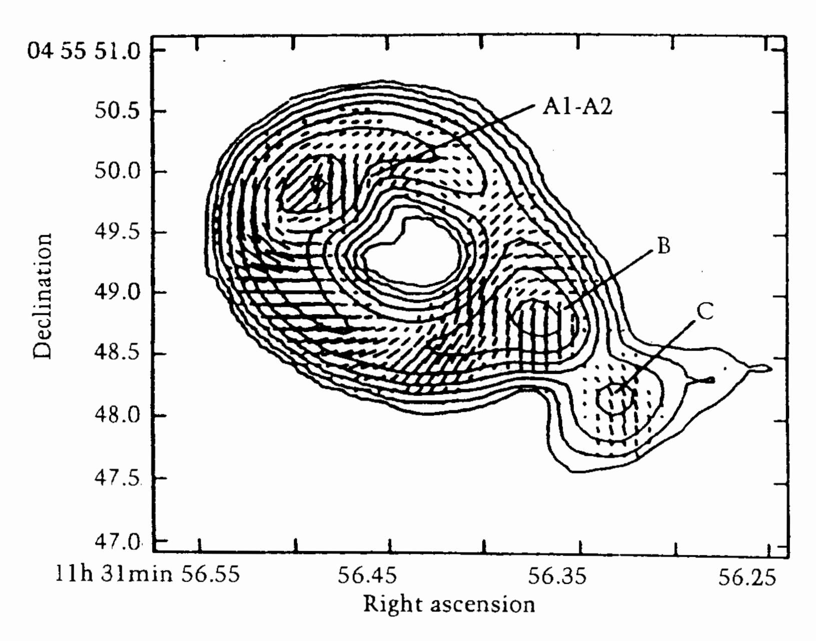
صُوَرٌ مشوّهةٌ بالشكلِ ذاتِه في عناقيدَ أخرى، مثلَ آبيل ـ ٩٦٣، وآبيل ٢٣٩٠، وكلُّها يُنبِئُ الفلكيَّ بأنَّ ما يظهرُ في آلةِ التصويرِ ليس موجوداً هناكَ بالضرورة.

ولننظرْ، أخيراً، في مثالٍ لحلقةٍ آينشتاينيةٍ حقيقية. فعندما تمّتْ دراسةُ المصدرِ الراديويِّ المسمىٰ MG 1131 +0456، مِن قِبَلِ مِرْقابِ «النظام فائقِ الكِبَرِ» Very Large Array، نتجَتْ عنه خريطةُ الحدودِ التي تظهرُ في الشكل ٦,٢٦. وشكلُ الحدودِ العامُّ هو حلقةٌ بيضاويةٌ سميكة، وبمحورٍ كبيرٍ يبلغُ حجمهُ ٢,٢ الثانية القوسية، ومحورٍ قصيرٍ حجمُه ١,٦ الثانية القوسية. وهناكَ مصادرُ أربعةٌ أخرىٰ هي A1 و A2 و B و C، ولكنْ ليس هناك مِن إشعاعٍ يخرجُ مِن داخل الحلقة.

إنَّ شكلاً كهذا لهوُ أمرٌ بالغُ الغرابةِ في المصدرِ الراديويّ، وهو يوحي مرةً أخرىٰ بأنَّ ما نراهُ ليس هو الحقيقةَ ذاتها، وإنما صورةً مشوّهةً عنها. ولقد قامَ العلماءُ بعملِ أنموذجٍ لهذه الحلقة، وبنجاحٍ كبير، مفترضين تمدّدَ المصدرِ ذاتِه. ورغم أننا لا نعرفُ بُعْدَ المصدرِ عنا، فإنَّ التفاصيلَ الهندسيةَ ترتّبُ تقييداتٍ كبيرةً على فكرةِ أنموذجِ العدسة، والذي يمكنُ الحكمُ على نجاحِه مِن مدى توافقهِ مع الصُّوَرِ المرصودة.

عودةٌ إلى الحركةِ فوقِ الضوئية Superluminal motion

نعودُ الآنَ إلى مشاهداتِنا للحركةِ فوقِ الضوئيةِ (أي تلك التي هي أسرعُ مِن الضوء)،

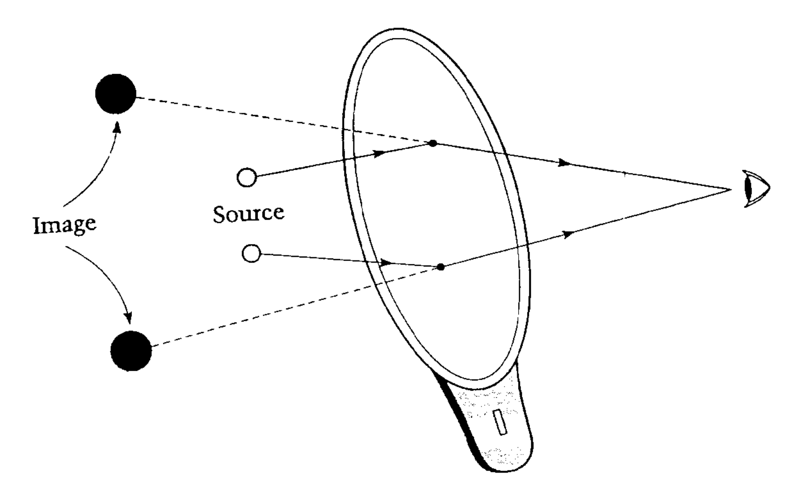


الشكل ٦,٢٦: تبدو خريطةُ الطولِ الموجيِّ مِن ٦ سم، للمصدر الراديويِّ MG 1131 +0456، مشابهةً لحلقةٍ آينشتاينية.

والتي نشاهدُها عَبْرَ مِدخالٍ ذي قاعدةٍ بالغةِ الطول very-long-baseline interferometry (VLBI)، والذي سبقَ وأن تطرّقْنا إليه في هذا الفصل. ولقد قُلنا إنّ هناك تفسيراتٍ ثلاثةً لهذه الحركةِ فوق الضوئية، والتي ناقشْنا اثنتيْنِ منها. ونتطرّقُ الآنَ إلى الفرضيةِ الثالثة، والتي تؤدي إلى ظاهرةِ العَدْسِ الجاذبيّ. ولقد اقترحَ س.م. شتري، والمؤلفُ، هذا التفسيرَ، عامَ ١٩٧٦، **وقبلَ ثلاثةِ أعوامٍ** من بروزِ فكرةِ العَدْسِ الجاذبيّ.

وحتّى نفهمَ هذا التفسير، فلننظرْ مِن خلالِ عدسةٍ اعتياديةٍ إلى كرتيْنِ صغيرتيْنِ، تفصلُ بينهما مسافةٌ قصيرة (الشكل ٦,٢٧). تبدو الكرتانِ أكثرَ بُعداً الواحدةُ عن الأُخرى عمّا هُما عليه في الحقيقة. تخيّلِ الآنَ أنَّ الكرتيْنِ تبتعدانِ عن بعضِهما البعضِ ببطءٍ. وإذا ما نظرْنا إليهما عَبْرَ العدسةِ، فإنَّ انفصالَهما، والذي سوف يظهرُ مكبّراً، سيبدو أنه يَزيدُ **بأسرعَ** مِن الحقيقة.

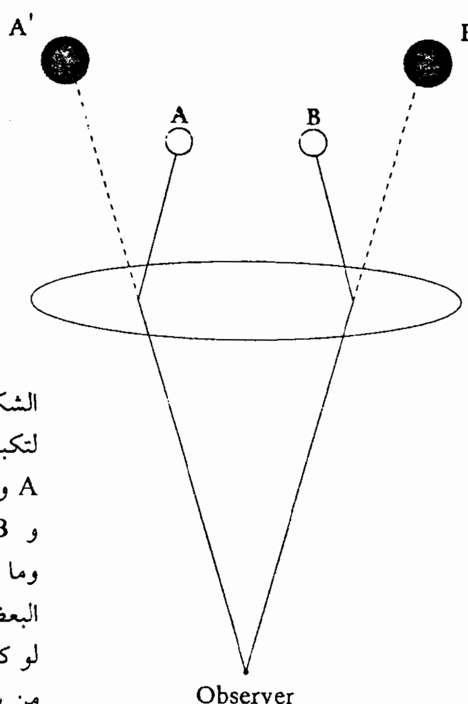
وهنا يكمنُ جوهرُ التفسير. إنّ الشكل ٦,٢٨ يُظهرُ لنا المخطَّطَ الموافقَ للكوازار. تخيّلْ أنَّ مجرّةً تقعُ على الطريق إلى الكوازار الذي يَعْدِسُ مكوِّنَيْها الاثنينِ المؤلفيْنِ مِن



الشكل ٦,٢٧ : تبدو الكرتانِ A و B، عند النظرِ إليهما مِن خلالِ عدسةٍ، أبعدَ الواحدة منهما عن الأُخرى عمّا عليه في الحقيقة. .

المِدخالِ السابقِ ذِكرُه. وإذا كانت المجرّةُ تقعُ على مسافةٍ متوسطةٍ مناسبةٍ بين هذه المصادرِ وبيننا، فإننا سوف نرى المسافةَ ما بينَ فصَّيْ مِدخالِ (VLBI) الاثنينِ مكبَّرَةً، وكما هو الحالُ عند استخدامِ العدسةِ الممسوكةِ باليد في الشكل ٦,٢٧، عندما يتمُّ الحصولُ على تكبيرٍ كبيرٍ بعدسةٍ توضعُ على مسافةٍ مناسبةٍ مِن المصدر. وعندما يبتعدُ الفصّانِ الواحد عن الآخرِ، فإننا نرىٰ سرعةَ انفصالِهما وقد تكبّرَتْ أيضاً.

وتدلُّ الحساباتُ المُجراةُ على نماذجَ للعدسةِ على أنَّ تكبيراً بالغاً للسرعةِ بهذا الشكلِ، يمكنُ أن يجعلَ السرعةَ تحتَ الضوئيةِ subluminal تبدو فوق ضوئيةٍ superluminal. ولفكرةِ العدسةِ فائدةٌ إضافيةٌ أيضاً، إذ يتمُّ تضخيمُ سطوعِ الصورةِ الأساسيةِ التي نراها بالعدسةِ، وهكذا يصبحُ التعرّفُ على الحالةِ فوقِ الضوئيةِ أكثرَ يُسراً للراصدين. كما يساعدُنا هذا الظرفُ في العثورِ على مثلِ هذه الحالات، بينما يجعلُ الموقعُ الخاصُّ نوعاً ما للمجرّةِ العادسةِ مِن هذه الظاهرةِ شيئاً نادراً إلى حدٍّ ما. وإذا ما أخذْنا هذيْنِ العامليْنِ المتعارضيْنِ معاً بنظرِ الاعتبارِ، فإنَّ سيناريو العَدْسِ يصيرُ معقولاً بقَدْرِ معقوليةِ سيناريو إرسالِ الأشعةِ beaming الذي ناقشْناهُ سابقاً. ولسوف يحدِّدُ مزيدٌ مِن الدراساتِ الاستكشافيةِ، كالدلالةِ غيرِ المباشرةِ على إرسالِ الأشعةِ، أو وجودِ مجرّاتٍ عادسةٍ معترِضةٍ، أيَّ التفسيريْنِ هو الصحيحُ (إن كان أحدُهما!). ولا يَزيدُ عددُ مِثلِ هذه



الشكل ٦,٢٨ : إنَّ مجرَّةً معترِضةً يمكنُ أن تعملَ عملَ عدسةٍ لتكبيرِ المسافةِ الفاصلةِ ما بين مكونيٌ مِدْخالَيْنِ (VLBI) اثنينِ A و B للكوازار. ويُظهِرُ الشكلُ كيف أنَّ أشعةَ الراديو مِن A و B تحنيها المجرةُ لتجعلَها تبدو وكأنها قادمةً مِن A^1 و B^1. وما نراهُ في واقعِ الحالِ هو صُوَرُ A^1 و B^1 مبتعدةً عن بعضِها البعضِ، وقد تبدو سرعةُ تباعدِها وقد فاقت سرعةَ الضوء حتىٰ لو كانت المصادر الحقيقيةُ تبتعدُ عن بعضِها البعض بسرعةٍ أقلَّ مِن سرعة الضوء.

المصادرِ، في الوقتِ الحاضر، على ٢٥ مصدراً، وهكذا فإنَّ الإحصاءاتِ التي تخصُّ هذا الموضوعَ شحيحةٌ إلى حدٍّ ما.

وداعاً للأُخدوعاتِ الفلكية

وهكذا نودِّعُ الآنَ تلك التوهّماتِ العجائبيةَ التي قد تخدعُ الفلكيَّ المتعجِّل. ولقد ناقشْنا بعضَ المصادرِ المنفردةِ، وكيف يمكنُ أن يُشَوِّهَ العَدْسُ الجاذبيُّ منظرَها. وقد يحدثُ أيضاً أن يشوّهَ العَدْسُ الجاذبيُّ مجموعةً كاملةً مِن المصادرِ، فتنتجُ عن ذلكَ أخطاءٌ في الحسابِ والمسحِ الاستقصائيِّ. وهذا يشبهُ قياسَ أطولِ الناسِ مِن خلالِ عدساتٍ مشوّهة. وإنه ليتوجَّبُ على الفلكيينَ أن يحسبوا حسابَ هذه التأثيراتِ عند تفسيرِهم لِما يرونَه.

ولكننا لم نَرَ بَعْدُ آخِرَ عَدْسٍ جاذبيٍّ في هذا الكتاب. ولسوف نواجهُه، مرّةً أخرىٰ، في مجالاتٍ أخرىٰ، في الفصلِ القادم، بينما نحنُ نَحُثُّ الخطىٰ للنظرِ في أكبرِ وأعظمِ أعجوبةٍ مِن بين الأعاجيبِ كلِّها، ألا وهي الكونُ المتوسِّعُ.

الأعجوبة (٧)

الكونُ المتوسِّع

﴿والسماء بنيناها بأييد وإنا لموسعون﴾.

[الذاريات: ٤٧]

صَدَقَ اللَّهُ العظيمُ.

ها قد أفرَدَ مؤلِّفُ الكتابِ، وهو عالِمٌ هنديٌّ مشهورٌ، وهو غيرُ مسلم، الفصلَ الأخيرَ مِن كتابه «أعاجيبِ الكونِ السبع»، للأعجوبةِ السابعةِ والأخيرةِ، وهي أمرٌ جَلَلٌ عظيمٌ هو أعظمُ ما عَرَفَتْهُ أبصارُنا في هذا الكونِ المخلوقِ قاطبةً، ألا وهو توسُّعُ الكونِ ذاتِه! فانظرْ، رَحِمَكَ اللَّهُ، كيف قد أحاطَ كتابُ اللَّهِ تعالىٰ، في آيةٍ قرآنيةٍ مُعجزةٍ واحدةٍ، هي غايةٌ في إبهارِ إعجازِها، بأعظمِ ما قد توصَّلَ إليه العلمُ الحديثُ، ألا وهو توسُّعُ الكونِ المستمرُّ، في جميعِ الاتجاهاتِ. فسبحانَ اللَّهِ الذي جاءَ في كتابِهِ الكريم بما لَمْ يُحَطْ به إلاَّ بعدَ أربعةَ عَشَرَ قرناً مِن الزمانِ مِن تنزيلِ العزيزِ الحكيم، مِن خِلالِ المَراقِبِ الضخمةِ التي أقيمت في القرنِ العشرين ﴿ولا يحيطون بشيءٍ من علمه إلاَّ بما شاء..﴾ [البقرة: ٢٥٥]، ونَظَلُّ نُرَدِّدُ خاشعينَ ﴿قُل صدق اللَّه..﴾ [آل عمران: ٩٥]. د.س

لسوف ننظرُ، في هذا الفصلِ الأخير، في أعظمِ مَظهرٍ مِن مظاهرِ الكون cosmos، والذي هو بُنيانُ العالَم universe، وإنما بالمقياسِ الكبير. والعالَمُ universe، في تعريفِهِ، يتضمّنُ **كلَّ شيءٍ** يمكنُ أن نُدركَهُ في الطبيعة. وهكذا فإنَّ الأعجوبةَ السابعةَ هي كلُّ ما يدورُ حول العالَم، في المكانِ والزمان. كيف جاء إلى الوجود، ومتىٰ؟ وما هو مداهُ الحاليُّ؟ وأيّانَ نهايتُه التي ينتهي إليها، إن كان ثَمَّةَ مِن نهايةٍ له؟[1] وهل إنه يحتوي

(١) فأمّا نهاية الأرض والمنظومة الشمسية، أو قيامُ قيامتها، فهذا أمرٌ محسومٌ جاء به كتابُ الله قبل أكثرَ من أربعة عشر قرناً، ثم أثبته العلم الحديث، في القرن العشرين. وأمّا نهاية الكون كله فذلك ما لا يعلمه إلاّ =

على أيِّ شيءٍ هو أبعدُ مِن أن نراه؟

وهذه التساؤلاتُ تبدو فلسفيةً، وهي قد شَغَلَت الفلاسفةَ، في مختلفِ الحضاراتِ، آلافاً مِن السنينِ، فعلاً. ولو تقصَّيْنا الآدابَ القديمةَ لوجدْنا كيف قد تفكّرَ الأوّلونَ وتوصلوا إلى أجوبةٍ على تساؤلاتِهم. وحيثُما كانت الحقائقُ غيرَ موجودةٍ، فلقد تمَّ إحلالُ خُرافاتٍ مناسبةٍ محلَّها. ولكنْ لا ريْبَ في أنَّ بعضاً مِن هذه الخرافاتِ قد كشف عن نُضْجٍ فكريٍّ كبير.

ويحاولُ العلماءُ، اليومَ، أن يتعاملوا مع هذه القضايا، مستخدمينَ وسائلَ مبنيةً على الحقائقِ المشاهَدةِ، ممزوجةً بوضعِ نماذجَ رياضيةٍ، حتى لو لم يمكنِ استبعادُ التكهنِ كليّةً. إنّ علمَ الكون cosmology يدورُ حولَ هذه المحاولاتِ كلِّها.

وقد يكونُ مِن الأحسنِ أن ننظرَ إلى محاولاتِ الفهمِ الحديثةِ هذهِ على خلفيةٍ مِن الخرافاتِ القديمة.

ما هي معتقداتُ الأقدمينَ عن الكون؟

تقول «**الرجفيدا**»، وهي واحدةٌ مِن الكتاباتِ القديمة للآريينَ في الهند:

> لم يكنْ هناكَ مِن «وجودٍ» existence، في ذلك الوقتِ (عندما لم يكنِ الكونُ قد خُلِقَ بَعْدُ)، لا ولا كان هناك «عَدَمُ وجودٍ» non - existence. ولم يكنْ ثمَّةَ مِن فضاءٍ، حينئذٍ، ولا سماءٍ غيره. ولم يكن هناك مِن سبيلٍ لتمييزِ الليلِ مِن النهار. كيف برزَ الوجودُ؟ ومَن ذا الذي يمكنُه أن ينبئَنا عن ذلك بالتفصيل، أو ذاك الذي يعلمُ على وجهِ التأكيد؟

ويوحي ذلك بأنَّ طُلاّبَ العلمِ قد أثاروا، في الأزمنةِ الفيداويةِ[1] Vedic times (قبلَ ١٥٠٠ق.م)، أسئلةً جوهريةً لا يزالُ علماءُ الكونِ يبحثونَ عن أجوبةٍ لها، حتى اليوم.

ثمَّ إنَّ الخُرافاتِ صارت تَحِلُّ مَحلَّ الإهمال، إذ كان يتوجبُ العثورُ على أجوبةٍ لإرضاءِ فضولِ الإنسانِ إلى حدٍّ ما. وتحتوي الخُرافات التي وُصِفَت في القصةِ الهنديةِ الأسطوريةِ «**البيوراناز**» على أفكارٍ مختلفةٍ عديدة، وهي مُغرِقةٌ في خيالِها.

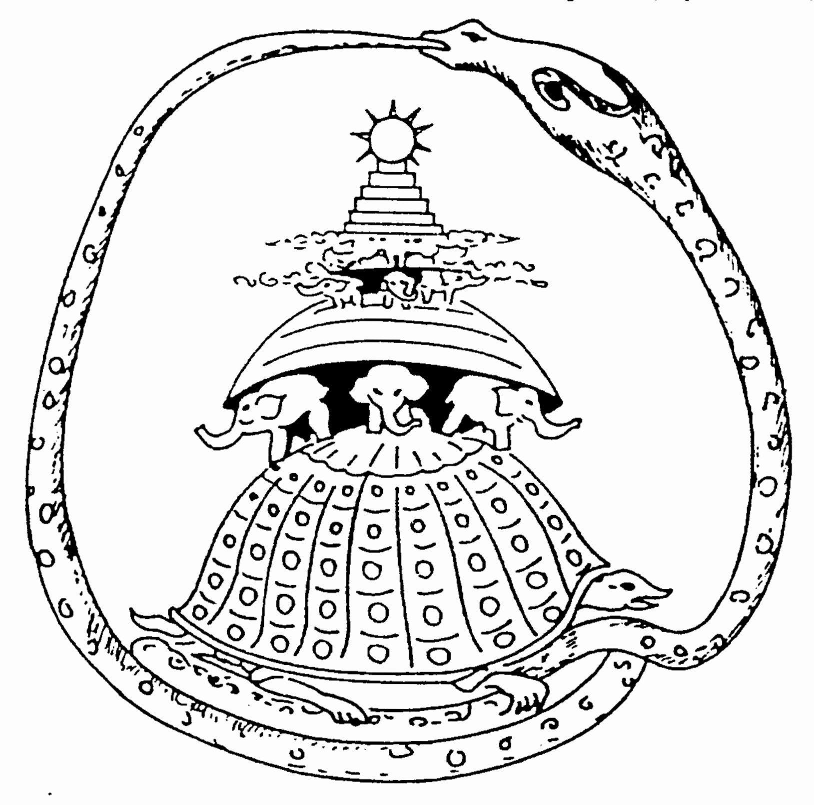
ويُظهِرُ الشكلانِ ٧,١ و٧,٢ بعضاً مِن تلك الأفكار. وتتضمنُ «**البراهماندا**»، أو

= خالقُه وحدَه ﴿وما أوتيتم من العلم إلاّ قليلاً﴾ [الإسراء: ٨٥] ـ انظر كتاب «القيامة بين العلم والقرآن» للمترجم، دار الحرف العربي، ط٢، (١٩٩٩). د.س

(١) الفيداوية نسبة إلى «الفيدا» الهندية. د.س



الشكل ٧,١ : القصةُ الهنديةُ الأسطوريةُ القديمة: لقد جاءَ الخلقُ مِن بيضةٍ كونيةٍ تدعىٰ بالبراهماندا.



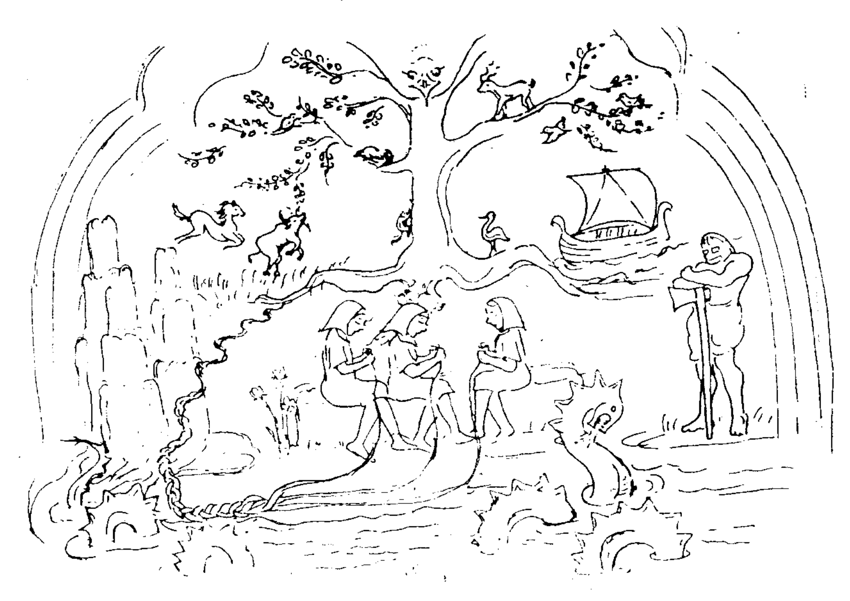
الشكل ٧,٢ : النوذجُ الهرميُ الذي يسندُ الأرض. وتحملُ الأفعىٰ المقدسةُ «الشيشاناغا»، في الأسطورةِ الهندية، الحِملَ كلَّه.

البيضةُ الكونيةُ، فكرةَ أنَّ الكونَ كلَّه قد خرجَ مِن بيضةٍ هائلة، بينما كان يُعتَقَدُ أنَّ الأرضَ ذاتَها تستقرُ على بِنيةٍ هرميةٍ تتضمنُ أربعةَ أفيالٍ، باتجاهاتٍ أربع، وهي تقفُ علىٰ سلحفاةٍ عظيمةٍ تستقرُ علىٰ أفعىٰ تفترسُ قوقعتَها. ولسوفَ نُشيرُ إلى الشكل ٧,٢ بنظرةٍ حديثةٍ فيما بعد.

ويُرينا الشكلُ ٧,٣ فكرةً أخرى، مِن مكانٍ آخرَ مِن الأرض. إنها «شجرةُ العالَم» الإسكندنافيةُ، والتي تصفُ الكونَ المرئيَّ (حينئذٍ) كلَّه محمولاً مِن قِبَلِ أجزاءَ مختلفةٍ مِن الشجرة. وتقولُ خُرافةٌ اسكندنافية، في حوالىٰ ١٢٠٠ ق.م:

> لم يكنْ هناك مِن رملٍ ولا بحرٍ، لا ولا أمواجٍ رفيقةٍ لطيفة... لم تكنْ هناك أيةُ أرضٍ، لا ولا السماءُ العُليا... ولم يكنْ ثمَّةَ مِن صَدْعٍ منفرجٍ، أو عشبٍ، في أيِّ مكانٍ.. كانت الأرضُ منبسطةً، ونَمَتْ وسطَها شجرةُ الحياةِ العظيمةُ المسماةُ بيغداسيل. وكانت شجرةُ الدردارِ تُسقىٰ مِن ثلاثِ عيونٍ سحريةٍ لم تجِفَّ قطُّ، وأوراقُ الأشجارِ كثيفةٌ ومخضرّةٌ على الدوام.

وإذا ما جئنا إلى مظاهرَ للكونِ ملموسةٍ أكثرَ مِن ذلك، كالحركةِ في المنظومةِ الشمسية، فلقد كان لفيثاغورسَ، وهو يونانيٌّ عاشَ قبلَ السيدِ المسيح بأربعةِ قرونٍ تقريباً، نظريةٌ تتلخصُ في أنَّ الأرضَ تدورُ حولَ نارٍ مركزية (الشكل ٧,٤)، وهي تُعطي

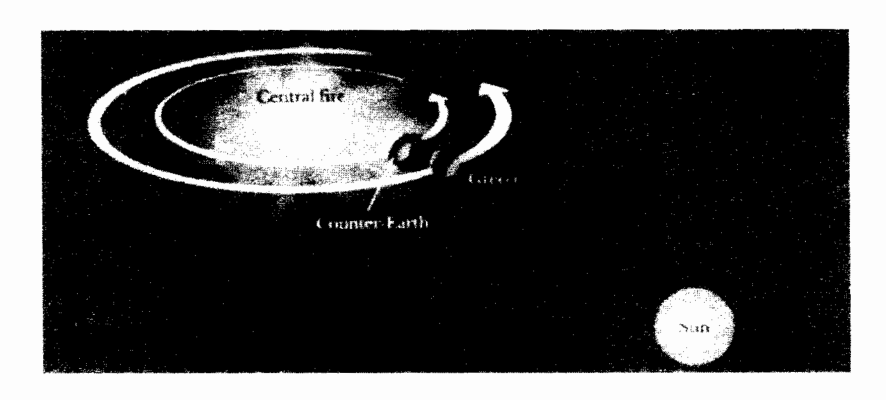


الشكل ٧,٣: شجرةُ العالَم الإسكندنافيّ، التي تصِفُ العالَمَ في المكانِ والزمان. وتمثّلُ المصائرُ الثلاثةُ التي تُمسِكُ بالجديلةِ الماضيَ والحاضرَ والمستقبل.

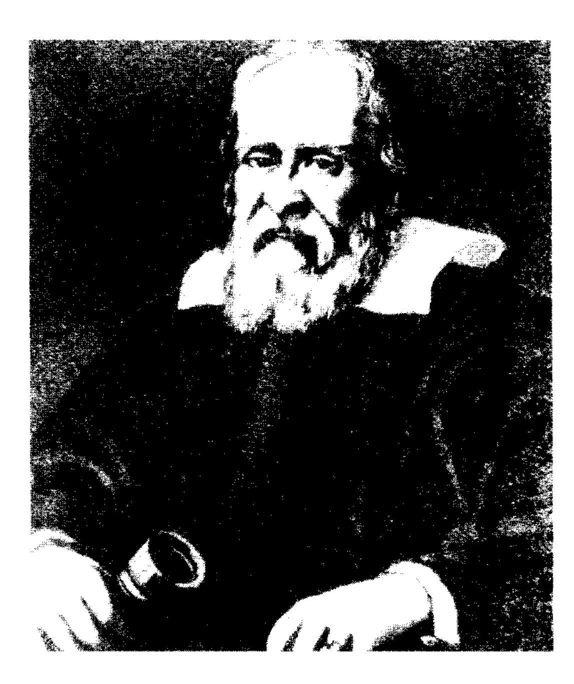
الوجهَ ذاتَه نحوَها في كلِّ حين (وكما يفعلُ القمرُ بالنسبةِ إلى الأرض، انظرْ الفصلَ الأول). ولا تقعُ الشمسُ في أيِّ مكانٍ داخِلَ المدارِ الأرضيِّ المفترَض. ولمّا تساءلَ المشككونَ لِمَ لا نرى النارَ المركزيةَ، قيلَ لهم إنّ «الأرضَ المضادّةَ» counter - Earth تحجُبُها عن أعيُنِنا، على الدوام، مِن خلالِ حركتِها مع الأرضِ، في الوقتِ ذاتِه، وكما يظهرُ في الشكل ٧,٤. وظلَّ المتشككونَ يتساءلونَ: ولماذا لا نرى الأرضَ المضادّةَ إذاً؟ وردَّ عليهم المدافعونَ عن النظريةِ بالقولِ إنَّ اليونانيينَ كانوا في الجهةِ الأخرى مِن الأرضِ، وهي الجهةُ البعيدةُ عن الأرضِ المضادّة. ولكنَّ النظريةَ أصيبت في مقتلٍ عندما ذهبَ مستكشفونَ قلائلُ إلى الجهةِ التي يُفترَضُ أنها تواجهُ النارَ المركزيةَ، ولم يجدوا لا ناراً ولا أرضاً مضادّة!

وكان ذلك المثالُ إحدى الحالاتِ المبكّرةِ التي أمكنَ فيها استخدامُ المشاهدةِ لإسقاطِ نظريةٍ ما. ولقد شكّلَ ذلك فجْرَ الطريقةِ العلمية، حيثُ لا يتمُّ تقبُّلُ التكهناتِ المحضةِ مِن دونِ إثباتٍ تجريبيٍّ أو مُشاهَدٍ لتبريرِ النظرية.

ولقد خَطَتْ مُشاهَدةُ الكونِ، في عام ١٦٠٩، خطوةً كبيرةً إلى الأمام، عندما وجّهَ غاليليو غاليلي (الشكل ٧,٥) مِرْقاباً (تلَسكوباً) للنظرِ إلى السماء. كانَ المِرْقابُ قد اكتُشِفَ قبلَ ذلك بأشهُرٍ قلائلَ فقط، وقد حَدَتْ قدرةُ المرقابِ على أن يجعلَ «البعيدَ» «قريباً»، على الأرضِ، بغاليليو إلى تطويرِ تلك الأداةِ، حتى يَرْصُدَ الشمسَ، والقمرَ، والكواكبَ السيارة. ولقد كان مرقابُ غاليليو (الشكل ٧,٦) متواضعاً جداً بالمقاييسِ الحديثة، ولكنه بشّرَ بمولدِ عهدٍ جديد. ولقد كانت الاكتشافاتُ التي أفضىٰ إليها المرقابُ



الشكل ٧,٤: النظرية الفيثاغورسيةُ إلىٰ منظومةِ الأرضِ ـ الشمس (انظرْ المَتْنَ للتفاصيل)، عن سايْنْتِفِكْ أميركان.

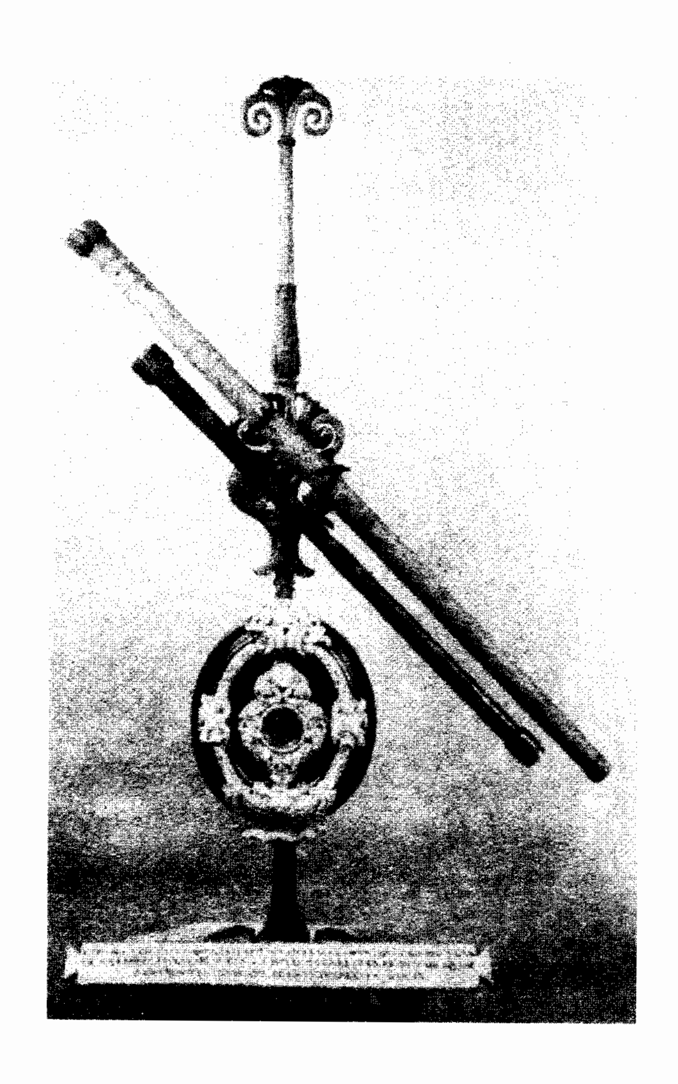


الشكل ٧,٥: غاليليو غاليلي.

كلُّها، في واقع الحالِ، مِثْلَ وجودِ الحُفَرِ على سطح القمرِ craters on the moon، والبُقَعِ الشمسيةِ، وأقمارِ المشتري الأربعةِ، غيرَ متوقَّعةٍ بالمرّةِ، بل وغيرَ مُرَحَّبٍ بها أيضاً.

ونقول: غيرَ مُرَحَّبٍ بها، لأنها كان يمكنُ أن تهزَّ المعتقداتِ القديمةَ السائدةَ، وكما هو عليه الحالُ مع الاكتشافات الجديدة. ولقد نُظِرَ إلى الفُوَّهات، أو الحُفَرِ الموجودةِ على سطحِ القمر، والبُقَعِ الشمسية، (الشكل ٧,٨)، على أنها عيوبٌ أو لطخاتٌ تشوبُ الخَلْقَ المقدّسَ، وهكذا فإنها تُصادِمُ عقيدةَ تمامِ الخلق[1]. وبالمِثل فإنَّ الاعتقادَ بأنَّ كلَّ

(١) يشيرُ المؤلفُ، وكما هو واضحٌ، إلىٰ الأفكار التي كانت، ولا تزالُ، سائدةً، في أوروبا عن تصادمِ الدينِ والعلم. وليس في الدينِ الحقِّ شيءٌ مِن ذلك البَتَّة. «إن الحركةَ الشاملةَ والمتشابهةَ، في نظام واحدٍ دقيق، لكلِّ ما في الكونِ، ما صَغُرَ منه وما كَبُرَ، والقوانينَ الواحدةَ التي تحكمُ كلَّ شيءٍ فيه، هي آياتٌ علىٰ وحدةِ الكونِ ووَحدانيةِ الخالق. قال تعالىٰ: ﴿الذي خلق سبع سموات طباقاً ما ترىٰ في خلق الرحمن من تفاوت فارجع البصر هل ترىٰ من فطور. ثم ارجع البصر كرتين ينقلب إليك البصر خاسئاً وهو حسير﴾ [الملك: ٣ و٤]، أي لا ترىٰ في خَلْقِ اللّهِ تعالىٰ شيئاً مِن الاختلافِ وعدمِ التناسُبِ، فلا عيبَ ولا نَقْص، ولا اضطرابَ ولا خَلَلَ، ولا اعوجاجَ في شيءٍ منها، بل إنها كلّها مُحكمَةٌ جاريةٌ علىٰ مقتضىٰ الحكمة. فانظرْ الكرّةَ بعدَ الكرّة، والمرّةَ بعد المرةِ، ينقلبْ إليك البصرُ خائباً عاجزاً عن رؤيةِ أيِّ نقصٍ أو خللٍ، بل يبهرُه الجمالُ والكمال، والانسجامُ والانتظام» ـ عن كتاب «أسرار الكون في القرآن»، دار الحرف العربي، =

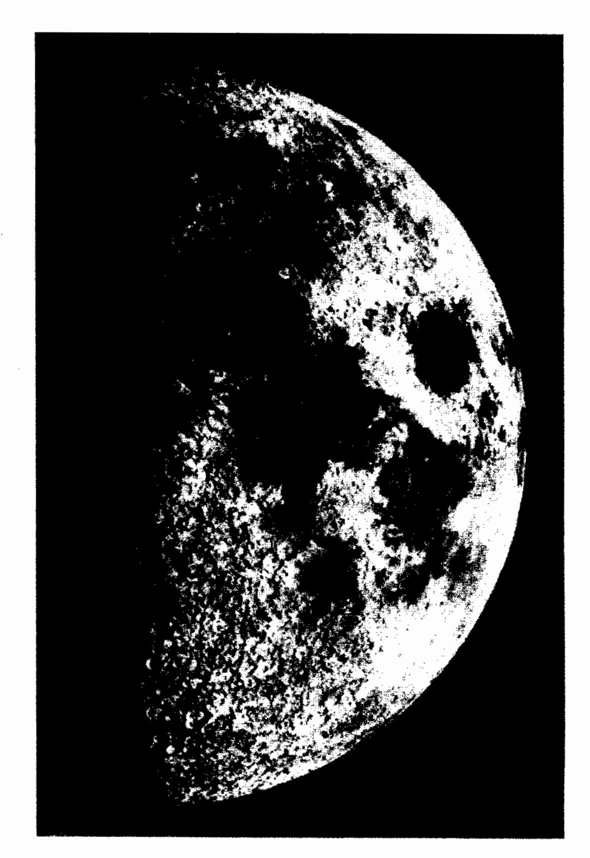


الشكل ٧,٦: المَراقبُ التي استخدمَها غاليليو. وتبلغُ فتحةُ المِرْقابِ الأكبرِ ٢,٦ السنتيمتر، وبعدُه البؤريُّ ١,٣٣ السنتيمتر، وكان تكبيرُه × ١٤.

شيءٍ يدورُ حول الأرضِ قد هدَّدَهُ اكتشافُ أربعةِ أقمارٍ تدورُ حول المشتري (الشكل ٧,٩).

وهكذا فلقد تطوّرَتْ صورةُ الكونِ إلى شكلِها الحديثِ الذي نعرفهُ عَبْرَ قرونٍ عديدة، وبأشدِّ ما يكونُ مِن البُطء. وقد انهارت أفكارٌ عديدةٌ خاطئةٌ مع تحسُّنِ وضوحِ الصورةِ لنا. ولسوف نضربُ صَفْحاً عن هذه الخطواتِ المتوسطةِ، حتى نصلَ إلى نظرتنا الحديثةِ إلى الكون.

= بيروت، ط٢، (١٩٩٩)، ص ٢٥٢. ثمَّ إنَّ وجودَ حُفرةٍ على سطح القمرِ، أو بقعةٍ شمسيةٍ، ليس مما يَعيبُ الخَلْقَ في شيء!. د.س



الشكل ٧,٧: صورةٌ حديثةٌ للحُفَرِ علىٰ سطحِ القمر، وقد اكتشَفها، أولَ مرّةٍ، غاليليو، بمِرْقابه (موافقةٌ مِن NASA).

نظرةٌ عامّةٌ علىٰ الكون

يمكنُ لنا أن نفهمَ ونُقَدِّرَ حجمَ الكونِ مِن خلالِ سلسلةٍ هَرَميةٍ متدرّجةٍ لمكوّناتٍ مِن أحجامٍ وكُتَلٍ متزايدة. وتظهرُ هذه الخطواتُ في الشكليْنِ ٧,١٠ و٧,١١، وواحدٌ منهما هو للحجمِ الخَطِّيِّ linear size، والآخَرُ للكتلة. ولقد تمَّ تقريبُ الأعدادِ المستخدَمةِ هنا صعوداً أوَ نزولاً مِن قِيَمِها المضبوطة، لمجرّدِ أن نحصلَ علىٰ فكرةٍ عن المقاديرِ magnitudes المشمولة.

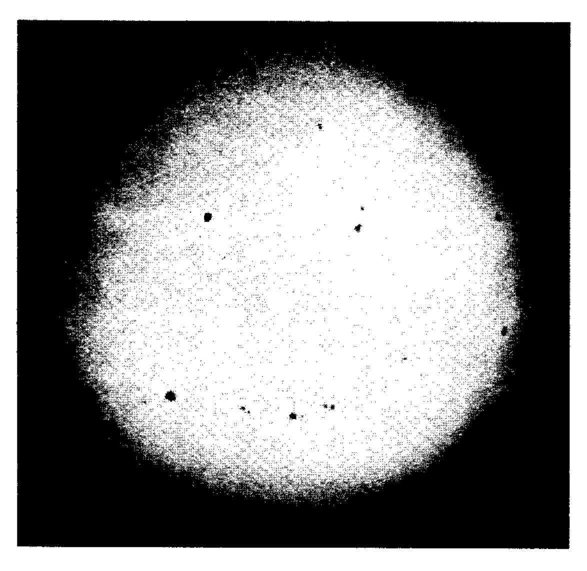
وابتداءً بالأرضِ، فإننا نعلمُ بأنّ نصفَ قُطرِها يبلغُ ٦٤٠٠ كيلومترٍ، وكتلتُها ٦٠٠٠ مليونِ مليونِ طُنٍّ. أمّا نصفُ قطرِ الشمسِ فيبلغُ نحواً مِن ١١٠ أضعافِ نصفِ قطرِ الأرض، وكتلتُها أكبرُ مِن كتلةِ الأرضِ بـ ٣٠٠٠٠٠ مرّةٍ.

والشمسُ هي نجمٌ أنموذجيٌّ. وكما رأيْنا في الفصلِ الثاني، فإنَّ الشمسَ متوسطةُ الحجمِ بالنسبةِ إلى النجومِ الأخرى، فهي ليست بالكبيرةِ ولا بالصغيرةِ، ولكنّ هناك ١٠٠

ـ ٢٠٠ بليون نجم في مجرّتِنا، أي مجرّةِ دربِ التبّانة Milky Way Galaxy. ويُرينا الشكلُ ٧,١٢ صورةً لهذه المجرّةِ تمَّ الحصولُ عليها بتصويرِها باتجاهاتٍ مختلفةٍ ولَمِّ الصُّوَرِ إلى بعضِها البعض. ولْنلاحظْ هنا بأننا ننظرُ إلى المجرّةِ مِن داخلِها، وهكذا فإنّه لا يمكنُ أن نحصلَ على صورةٍ كاملةٍ لها. ولكنّ الشكلَ ٧,١٣ يُرينا كيف يمكنُ أن يبدُوَ منظرُ المجرّةِ مِن زوايا مختلفةٍ. إنّها على شكلِ قرصٍ يوجدُ بروزٌ في مركزِه. وللقُرصِ نفسِه أذرعٌ حلزونيةٌ، حيث تتوزعُ النجومُ فيها بصورةٍ أشدَّ كثافةً. وتقعُ الشمسُ ومنظومتُها مِن الكواكبِ السّيارةِ حوالىٰ ثُلثيِّ المسافةِ بعيداً عن مركزِ القُرص. وكما نرى في الشكل، فإنَّ قطرَ القُرصِ يبلغُ ١٠٠٠٠٠ سنةٍ ضوئيةٍ تقريباً.

والمستوىٰ التالي من تركيبةِ هذا الهرمِ المتسلسلِ هو المجموعةُ التي تنتمي المجرّةُ إليها. إنَّ مجرَّتَنا هي عضوٌ في «المجموعةِ المحليّة» Local Group، والتي تحتوي على نحوِ مِن عشرينَ مجرّة. ولكنَّ هذه المجرّاتِ ليست متساويةً في أحجامها. وتسيطرُ مجرّتُنا ومجرّةُ المرأةِ المُسَلْسَلَةِ «الأندروميدا» Andromeda (رقمُها المفهرَسُ هو M31، في فهرسِ ميسير Messier Catalogue) على المجموعة المحليّة. وتبلغُ المسافةُ ما بين مجرّتِنا ومجرّةِ الأندروميدا حوالىٰ مليونيّ سنةٍ ضوئية. انظرْ صورةَ هذه المجرّةِ في الشكل ٧,١٤.

ورغمَ أنّ هذه الصُّوَرَ تقعُ ضمنَ أطوالِ الموجاتِ البصرية، أي المرئيةَ منها، فإنَّ



الشكل ٧,٨: بقعٌ شمسيةٌ sunspots تمّ تصويرُها بآلاتٍ حديثة (عن المراصد البصرية الفلكية الوطنية).

هناك، وكما قد رأيْنا، مجرّاتٍ تبعثُ بالأشعةِ تحتِ الحمراء، أو أشعةِ الراديو، أو أشعة إكس، ويكونُ انبعاثُ المجرّاتِ، في بعضِ الأحيانِ، مِن تلك الإشعاعاتِ، أكثرَ مِن إشعاعِها لأطوالِ الموجاتِ البصرية. ولقد رأيْنا أمثلةً على المجراتِ الراديويةِ في الفصل الخامس.

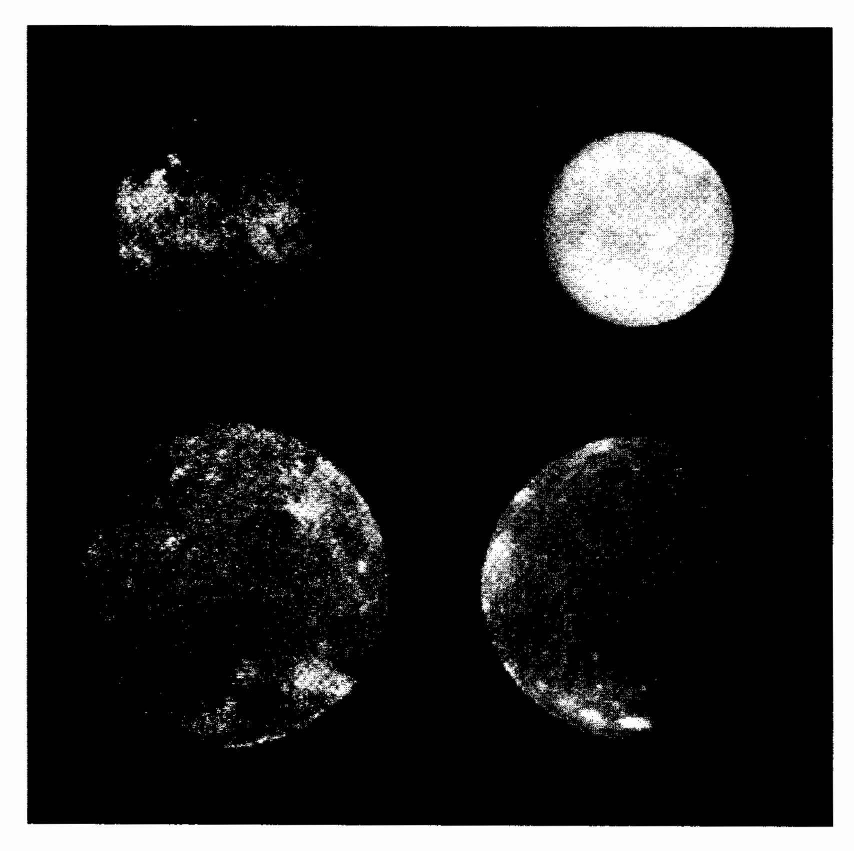
ويُرينا الشكلُ ٧,١٥ **عنقوداً cluster** مِن المجرّات. وربما يحتوي العنقودُ النموذجيُّ على المئاتِ مِن المجرّات. وقد يتراوحُ قطرُ العنقودِ ما بين ٥ و١٠ ملايين سنةٍ ضوئية، وقد يحوي مِن الكتلةِ ما يُعادلُ مئاتٍ عديدةً مِن ملايينِ الملايينِ من الكُتَلِ الشمسية.

ولقد ظلَّ الاعتقادُ سائداً، ولفترةٍ طويلةٍ، بأنَّ الكونَ لا يحتوي على تركيباتٍ أكبرَ مِن عناقيدِ المجرّات، وأنّ الكونَ متجانسٌ، مثلاً، على مقياسٍ أكبرَ مِن ثلاثينَ مليون سنةٍ ضوئية. ولكنَّ الرسومَ المنهجيةَ للمجرّاتِ في الفضاءِ، والدراساتِ المفصّلةَ لعناقيد النجوم، كشَفَتْ في العقودِ الثلاثةِ المنصرمةِ، عن عَدَمِ تجانس inhomogeneity، على مقاييسَ أكبرَ حتىٰ مِن ذلك، وكما يظهرُ في الشكل ٧,١٦. ونرى هنا **عناقيدَ ضخمةً superclusters**، على مقياسٍ مِن ١٥٠ مليونَ سنةٍ ضوئية، وبكُتَلٍ هي ضِعفُ كتلةِ العنقودِ بعشرةٍ إلىٰ مائةِ ضعفِ كتلةِ العنقود. ثمَّ إنَّ هذه العناقيدَ الضخمةَ تُرينا بِنيةً خيطيةً filamentary structure، وتفصلُ بينها **فجواتٌ voids** تمتدُ هي أيضاً إلى أكثر مِن ١٠٠ مليونِ سنةٍ ضوئية.

هل إنَّ التراتُبيّةَ، أو الهَرَمَ المتسلسلَ hierarchy هذا، يمتدُ إلى مستوىً أعلىٰ حتىٰ مِن ذلك؟ لا يوجدُ لدينا، في الوقتِ الحاضر، مؤشّرٌ على ذلك، ولكنَّ مِن العدلِ أن نقولَ بأنّ الفلكيينَ لم يَصِرْ في مقدورهم بَعْدُ أن يحللوا، بصورةٍ منهجيةٍ، مناطقَ بهذا الحجم، ولنقلْ مِن ٥٠٠ مليون سنةٍ ضوئية، حتىٰ يروا إنْ كانت ثمّةَ تجمّعاتٌ على مقاييسَ كهذه.

إنّ أعلى مقياسٍ للطولِ، على الإطلاق، في الشكل ٧,١٠، إنما هو للكونِ ذاتِه! وقد يكونُ الكونُ، في واقعِ الحالِ، لانهائياً أو غيرَ محدودٍ boundless، ولكنَّ المسافةَ التي يمكنُ أن نسْبُرَ غورَها، بأحسنِ ما لديْنا مِن المَراقبِ، تبلغُ حوالىٰ ١٠٠٠٠ مليونِ سنةٍ ضوئية. وقد تصلُ الكتلةُ المحتواةُ في كرةٍ بهذا الحجمِ إلى عدّةِ آلافٍ مِن مليونِ مليونِ مليونِ كتلةٍ شمسية، وكما نرى في الشكل ٧,١١.

وإذا ما تفحّصْنا هذا التركيبَ المعقّدَ والعملاقَ، فإننا نبتدِئُ حقيقةً في إدراكِ ضآلةِ

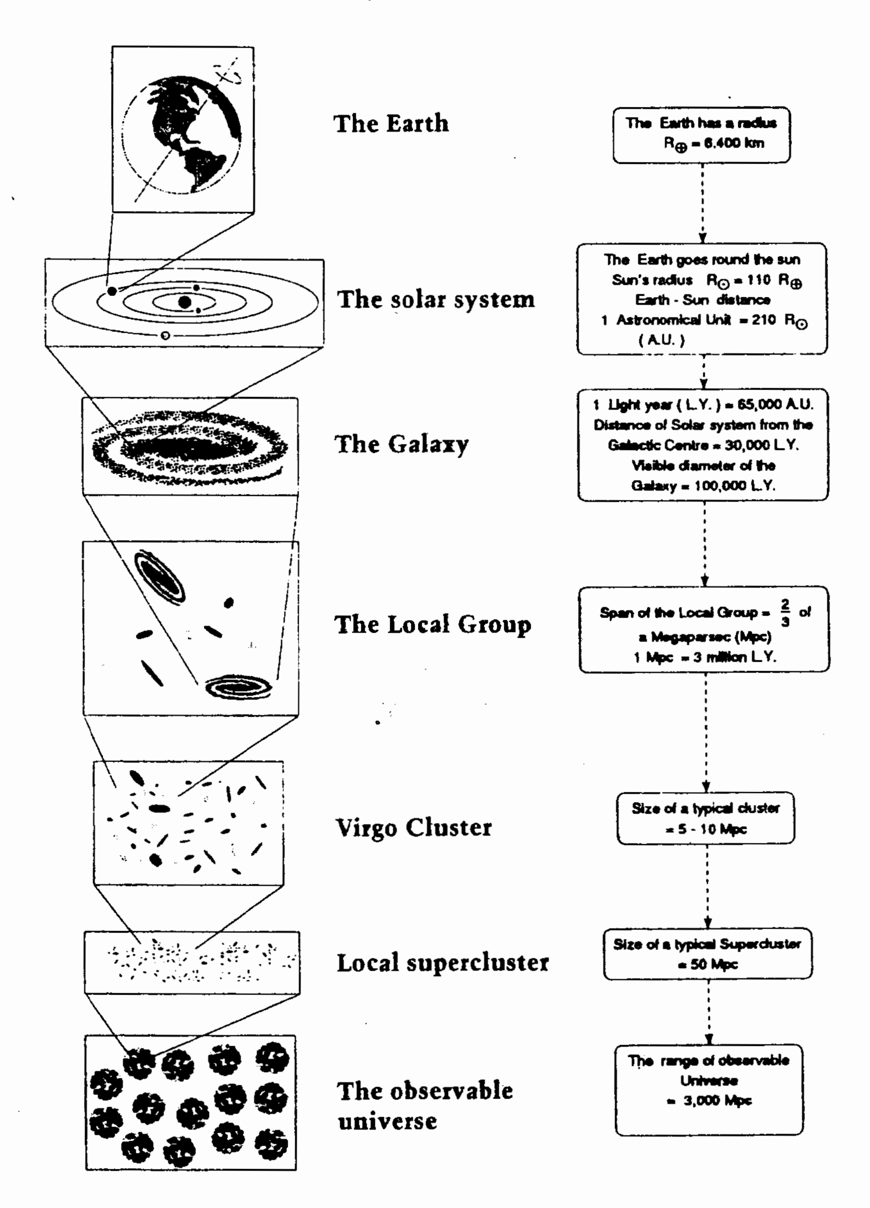


الشكل ٧,٩: الأقمارُ الداخليّةُ الأربعةُ للمشتري، والتي شاهدَها، أوّلُ مَن شاهدَها، غاليليو. ومِن المعروفِ أنَّ للمشتري ١٦ قمراً تابعاً على الأقلّ. وقد أُخِذَتْ هذه الصُّوَرُ بالسفينةِ «الرحّالة ١» (فويجر ١)، في آذار من عام ١٩٧٩ (موافقةٌ من «ناسا»).

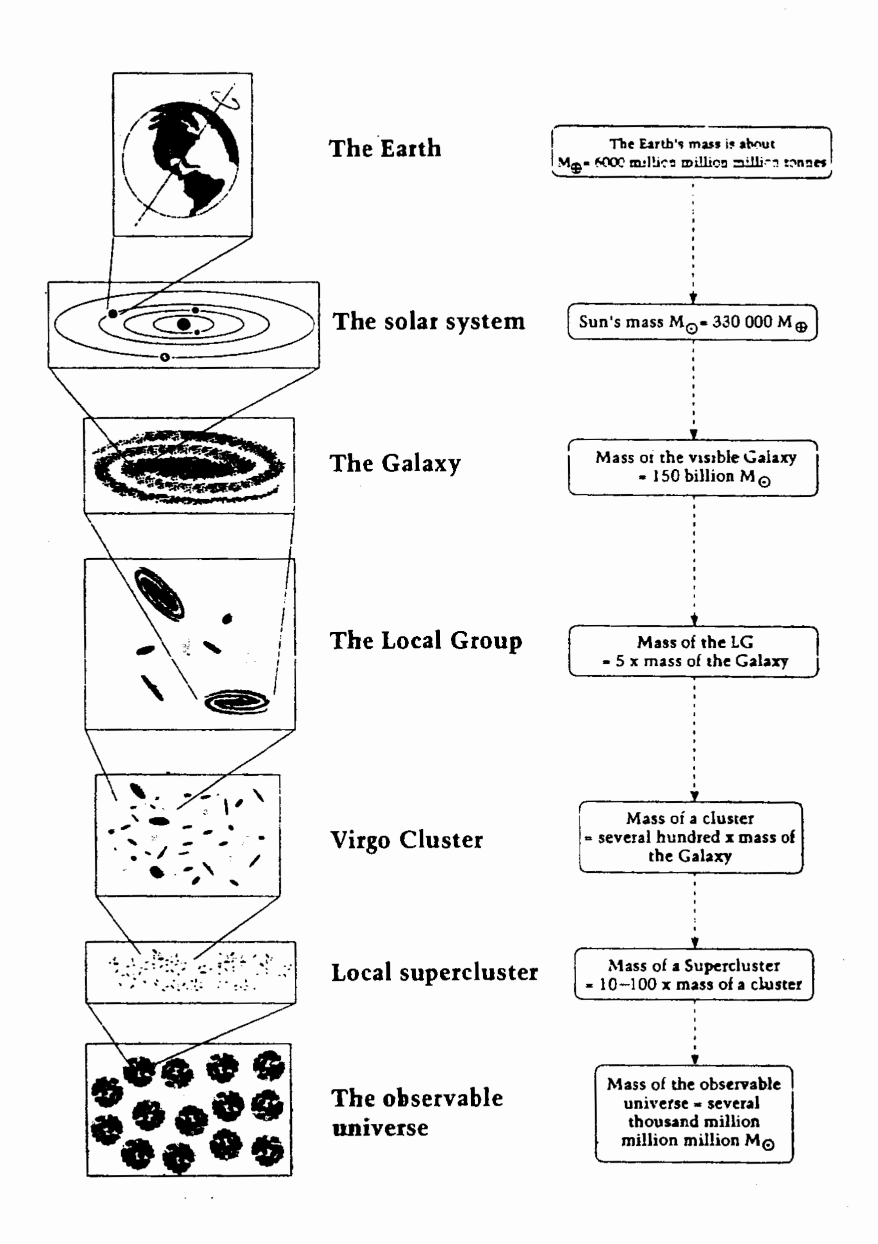
بيئتِنا الأرضية. إننا نعيشُ على كوكبٍ سيّارٍ ضئيل[1]، يدورُ حول نجمٍ هو عضوٌ في مجرّةٍ تحتوي على مائةِ ألفِ مليونِ نجمٍ مُشابه، وهي مجرّةٌ عضوٌ في مجموعةٍ صغيرةٍ هي جزءٌ مِن عنقودٍ ينتمي إلىٰ عنقودٍ أعظم supercluster، والذي هو بدورِه واحدٌ مِن عناقيدَ عُظمىٰ عديدةٍ في عالَمٍ فسيحٍ قد يكونُ غيرَ محدود. ويذكّرُنا هذا التراتُبُ المتسلسلُ بالتراتُبِ الهندي الذي وصفناهُ سابقاً.

---

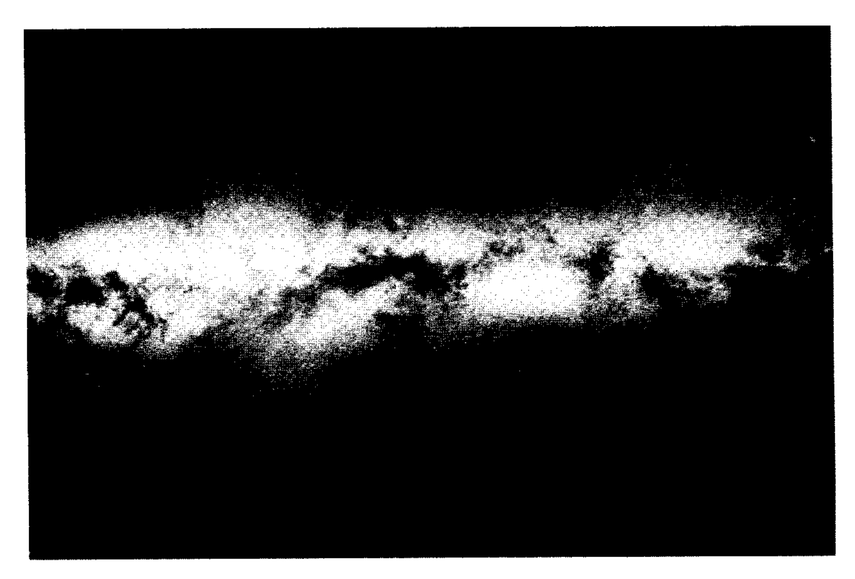
(١) نقل الطبرسيُّ، في «مجمع البيان في تفسير القرآن»، ما رُوي عن عطاءٍ عن رسول الله (ﷺ) أنه قال: «ما السماوات السبع والأرض عند الكرسيّ إلاّ كحلقة خاتمٍ في فلاة، وما الكرسي عند العرش إلاّ كحلقةٍ في فلاة». د.س



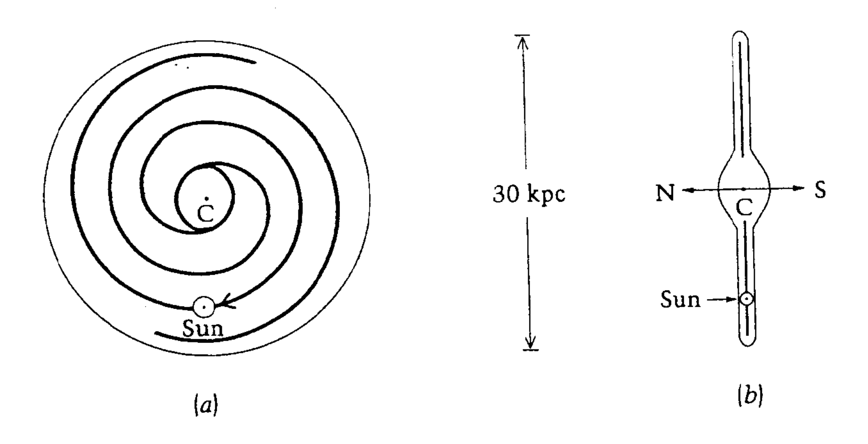
الشكل ٧,١٠: أحجامٌ نموذجيةٌ لتركيباتٍ مختلفةٍ، في الهَرَمِ التراتُبيِّ للكون.



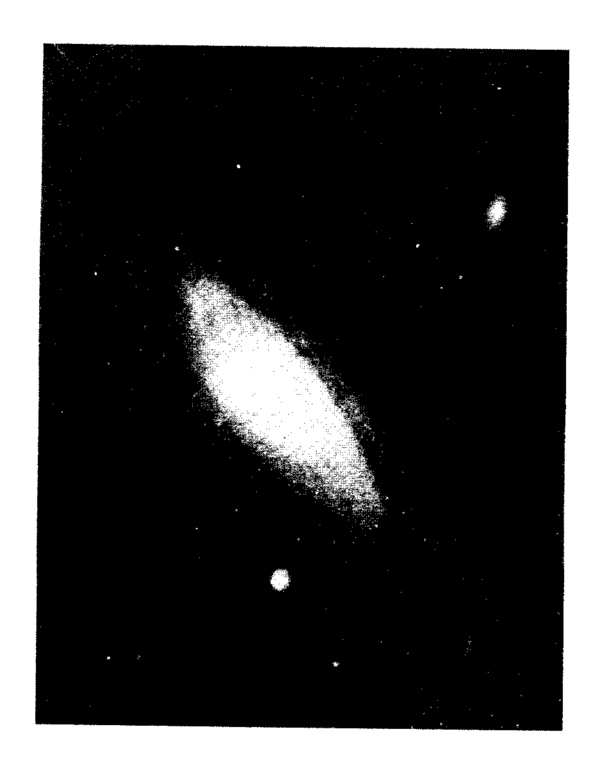
الشكل ٧,١١: كتلٌ نموذجيةٌ لتركيباتٍ مختلفةٍ في الهَرَم.



الشكل ٧,١٢: صورةٌ مركّبةٌ لمجرّة دربِ التّبّانة Milky Way Galaxy، وقد تمّ الحصولُ عليها بتجميعِ صورٍ باتجاهاتٍ مختلفة.



الشكل ٧,١٣: مجرّةُ دربِ التّبّانةِ كما تبدو (أ) وجهاً لوجه (ب) من جانبها. إنّ وحدةَ الطولِ المستخدمةَ هي الكيلو فرسخ Kiloparsec (kpc)، وهو يساوي ثلاثةً ورُبْعَ ألفِ سنةٍ ضوئيةٍ تقريباً. ويبلغُ قطرُ المجرّةِ ٣٠ كيلو فرسخاً، أي ما يُعادل ١٠٠٠٠٠ سنةٍ ضوئية.



الشكل ٧,١٤: مجرّةُ المرأةِ المسلسلةِ «الأندروميدا» Andromeda (صورةٌ مِن المراصدِ الفلكيةِ البصرية الوطنية).

ولقد وصفَ أدنغتون التحدّي الرهيبَ، الذي يُواجهُ الفلكيينَ، والذي يثبّطُ مِن هِمَمِهِمْ، بالكلماتِ التالية:

إنَّ الإنسانَ، في بحثِه عن المعرفةِ في الكونِ، هو أشبهُ بحشرةٍ للبطاطةِ، في ثمرةِ بطاطةٍ، في كيسٍ يرقدُ في عنبرِ سفينةٍ، وهو يحاولُ أن يستكشفَ، مِن خلالِ حركةِ السفينة، طبيعةَ البَحر العظيم.

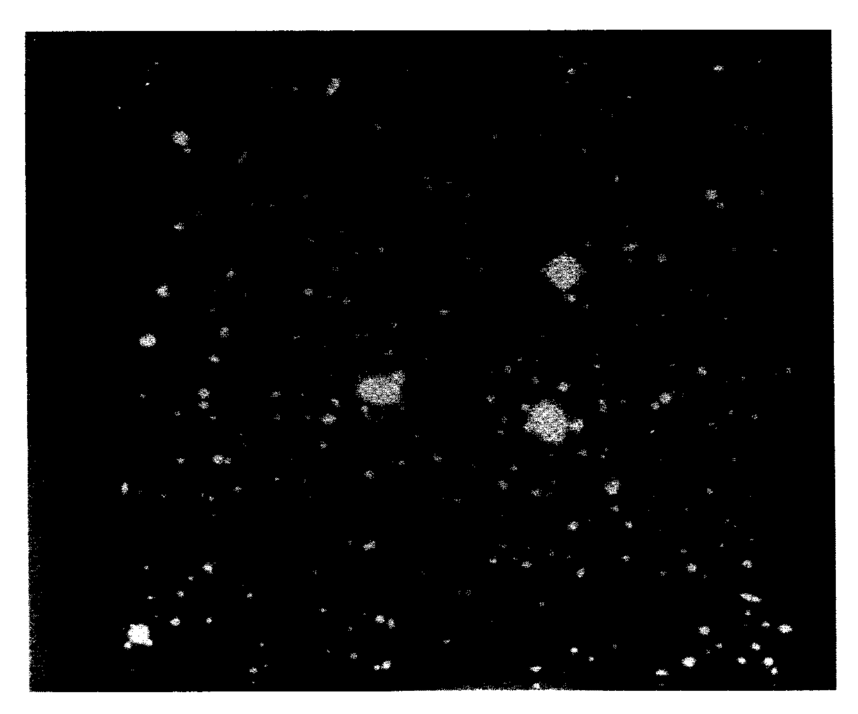
ولكنَّ الفلكيينَ قد قَبلوا التحدّي، وإليهم يعودُ الفضلُ في إحرازِ تقدّمٍ هامٍّ في تجميعِ أجزاءِ الصورةِ، للحصولِ على فهمٍ جزئيٍّ، على الأقلِّ، لأحْجيَةِ الكونِ. وكما قد عبَّرَ آينشتاينُ عنها، مرّةً:

إنَّ أكثرَ شيءٍ لا يُسْبَرُ غَوْرُهُ إبهاماً في الكون هو كونُه سهلَ الإدراك.

تلك هي أُعجوبتُنا السابعةُ، الكون ذاته، وبكلِّ خصائصِه البارزةِ التي تكشّفتْ لنا حتى الآنَ، وأسرارِه المُعَذِّبَةِ التي يتعيَّنُ علينا اكتشافُها.

لِمَ هي السماءُ مظلمةٌ في الليل؟

لقد ابتدأْنا بهذا السؤال البسيط، رغمَ أنه لا تكادُ تتبَيَّنُ صِلَتُهُ، مِن الوهلةِ الأولى،



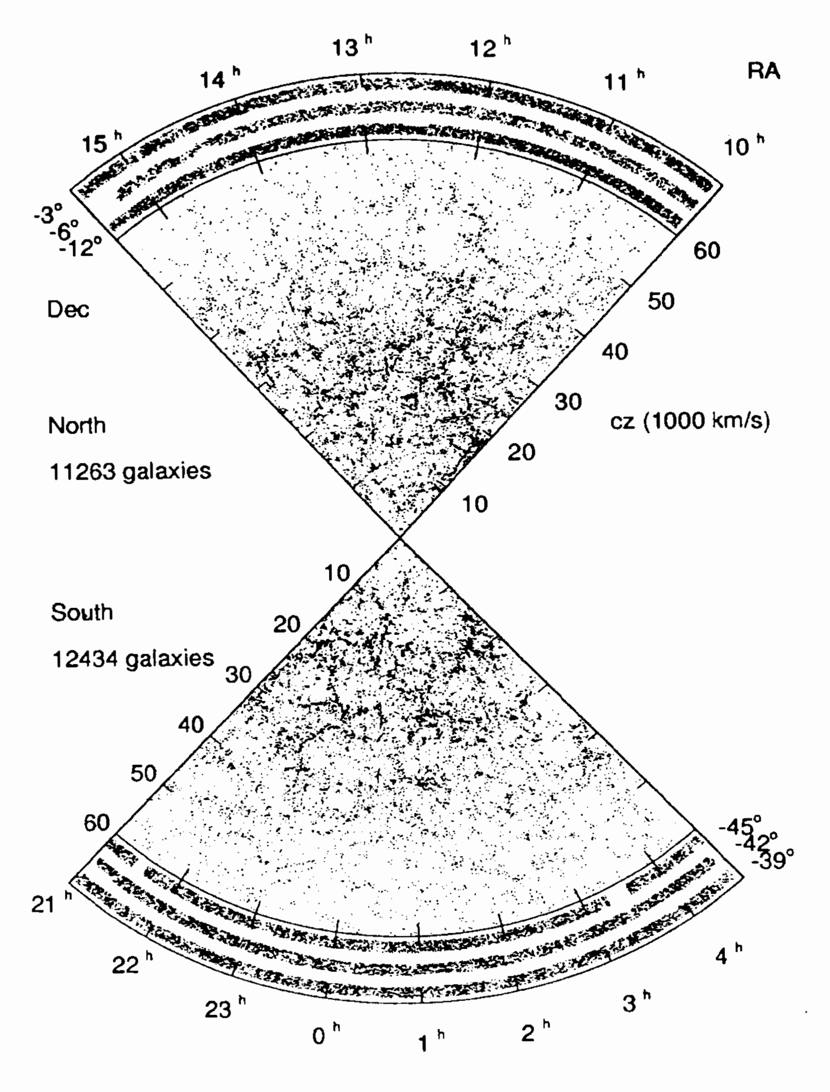
الشكل ٧,١٥: عنقودُ مجرّاتِ الذوّابةِ Coma cluster of Galaxies، صورةٌ مِن المَراصدِ الفلكيةِ البصريةِ الوطنية.

بعلم الكون. إنه جزءٌ مِن خبرةٍ يوميةٍ مُعاشةٍ تنبئُنا بأنَّ الأرضَ تلفُّ حول محورِها مرّةً كلَّ ٢٤ ساعةً، وأنّ الظلامَ يلفُّ الجزءَ البعيدَ مِن سطحِها عن مواجهةِ الشمس. أَوَليسَ ذلك بجوابٍ شافٍ على سؤالنا؟

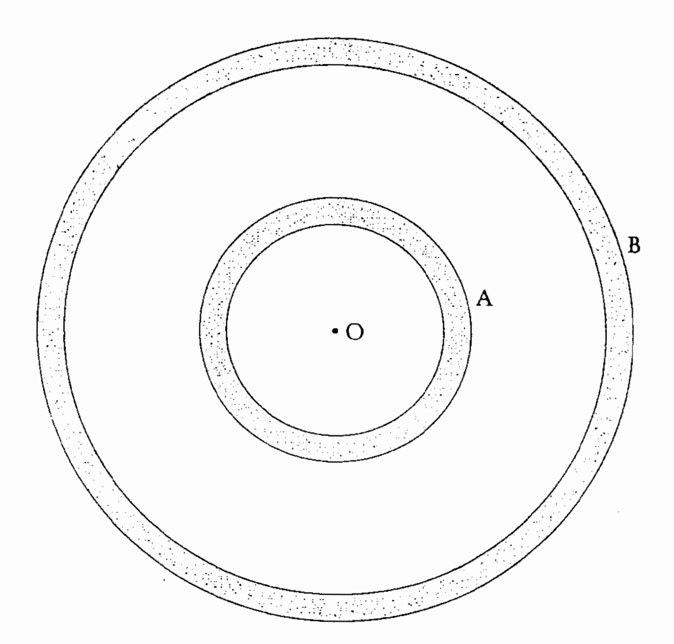
لكنَّ هاينرِك أولبرز، وهو فلكيٌّ ألمانيٌّ، لم يكنْ مقتنعاً بهذا الجواب، وقام بإجراء حساباتٍ، في عام ١٨٢٦، كانت نتيجتُها مُرَوِّعَةً وبدرجةٍ شغَلَتْ فكرَ الفلكيينَ قرناً ونصفَ قرن، حتىٰ يعثروا على الخطإِ الذي وقعَ فيه أولبرز. إذْ لو كان مُحِقّاً، لكانت السماءُ ساطعةً غايةَ السطوعِ طيلةَ الوقت، وبصرفِ النظرِ عن جهةِ الأرضِ التي تواجهُ الشمس.

وبرهانُ ذلك، وهو ما يُعرَفُ **بمتناقضةِ أو مفارَقةِ أولبرز Olbers paradox** هو، في الأساسِ، الآتي:

إنَّ السماءَ تحتوي، إضافةً إلى الشمسِ، على نجوم كثيرةٍ جدّاً تشعُّ الضياءَ أيضاً، وهو ما سيتّجِهُ قسمٌ منه إلينا. وبالطبع، فإنَّ الضوءَ القَادمَ مِن نجمٍ نموذجيٍّ سيكونُ



الشكل ٧,١٦: خريطةٌ للعالَم، علىٰ مستوىٰ المسافاتِ الشاسعةِ، وهي تبيِّنُ فَجَواتٍ، وعناقيدَ، وخيوطاً، في توزيعِ المجرّات، والتي تبدو علىٰ شكلِ نِقاط. ويصِفُ الشكلُ مَسْحَ الإزاحةِ الحمراءِ لِلاس كومباناس «Las Companas Redshift Survey»، وهي تحتوي علىٰ ٢٦١٨ مجرّةً، بإزاحاتٍ حمراءَ نموذجيةٍ مِن ٠,١ تقريباً، ومنتشرةً علىٰ حوالىٰ ٧٠٠ درجةٍ مربّعةٍ مِن السماء. وتُتَرْجَمُ الإزاحاتُ الحمراءُ إلىٰ مسافاتٍ، باستخدامِ قانون هابل ـ عن المجلةِ الفلكية (١٩٩٦).



الشكل ٧,١٧: إنَّ النجومَ، في قشرةٍ نموذجيةٍ حولَ الراصدِ (O)، الموجودِ في المركزِ، تشاركُ بدفقٍ إشعاعيٍ يقعُ علىٰ (O) ولا يعتمدُ علىٰ بُعْدِ القشرة. وهكذا فإنَّ قشرتيْنِ تملكانِ السَّمكَ ذاتَه، وهو A و B في الشكل، تشاركانِ بالدفقِ ذاتِه علىٰ (O).

ضئيلاً جدّاً، بسبب بُعدِه الشاسع عنّا. ولكنّ أولبرز دافعَ عن ذلك بالقولِ إنَّ هناك نجوماً في الكونِ هي مِن الكثرةِ بحيثُ إنَّ مجموعَ مساهماتِها قد لا يكونُ تافهاً. ولذا فقد عَزَمَ على أن يحسبَها مستخدماً برهاناً بسيطاً.

فلنتخيّلْ بأنّ الكونَ غيرُ محدودٍ، أي لامُتناهٍ infinite universe في سعتِه، وأنّه مليءٌ، وبصورةٍ منتظمةٍ، بنجوم يُشبِهُ كلُّها الشمسَ. فإذا ما رسمْنا كرةً بنصفِ القطرِ R، وبقشرةٍ رقيقةٍ على سطحِها (الشكل ٧,١٧)، فسوف تكونُ مساحةُ الكرةِ السطحيةُ هي $4\pi R^2$، حيث إنَّ π هي النسبةُ الثابتةُ، و R هو نصفُ القطر. وإذا كان سَمكُ القشرةِ هو a، فإنَّ حجمَها سيكونُ بقَدْرِ المساحةِ مضروبةً في السَّمْكِ تقريباً، أي $4\pi R^2 a$ (لقد تخيّلْنا بأننا بسطْنا القشرةَ الكرويةَ على شكلِ صفيحةٍ مسطّحة). ثمَّ إذا ما كان يوجدُ في الكونِ العددُ N مِن النجومِ في وحدةِ الحجم، فإنَّ عددَ النجومِ في هذه القشرةِ سيكونُ $4\pi R^2 a N$. ولنتخيّلِ الآنَ نجماً نموذجياً في القشرةِ يملكُ الإضاءةَ L، فإنَّ كميةَ إشعاعِهِ المارّةَ عَبْرَ وحدةِ المساحةِ، في مركزِه (O)، ستكونُ $L/(4\pi R^2)$ (لقد ناقَشْنا،

بتوسّعِ أكبرَ، أموراً مِثلَ الإشعاعِ المستَلَمِ مِن نجمٍ ما، في الفصل الثاني)، وهكذا فإننا نرىٰ مِن خلالِ ضربِ هذه الكميةِ بعدَد النجوم في قشرتِنا، بأنَّ هذه النجومَ تشاركُ بتدفّقٍ كليٍّ للإشعاعِ يساوي L Na في موقِعِنا. ونلاحظُ هنا بأنّ النتيجةَ **لا تعتمدُ على بُعْدِ النجومِ المُشِعَّة**.

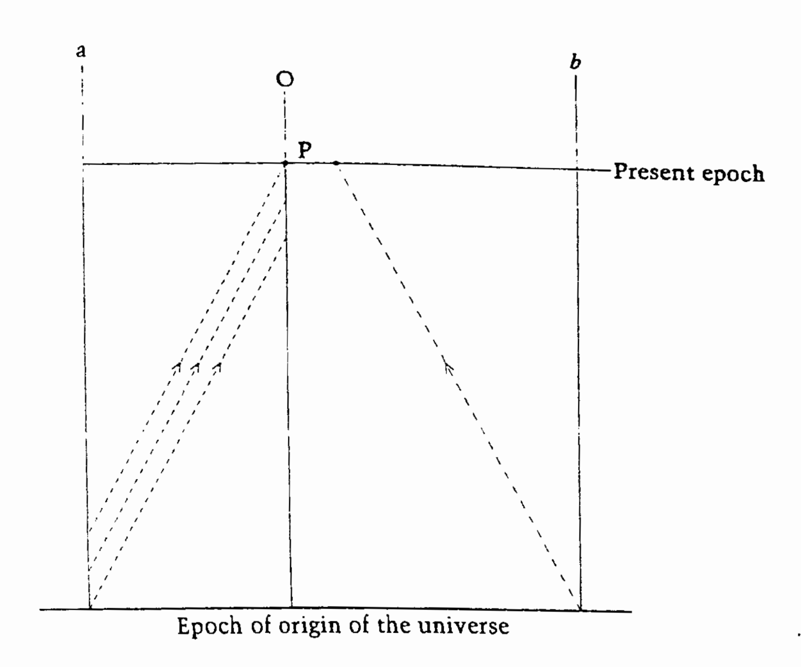
وهكذا فلقد صارَ الجزءُ الأخيرُ مِن برهانِ أولبرز واضحَ المعالم. فبالنسبة إلى أيِّ راصدٍ، مثلِنا نحنُ، يمكنُ قسمةُ الكونِ كله إلى قشراتٍ كرويةٍ متراكزةٍ (أي متّحدةِ المركز)، ومتساويةِ السَّمك. وكما بيّنّا، فإنَّ كلَّ قشرةٍ تشاركُ بالدَّفقِ ذاتِه على الراصد. **ولكنَّ مِن الواضحِ أنّ عددَ مثلِ هذه القشراتِ هو لانهائيٌ (غيرُ محدودٍ)**. وينتجُ عن ذلكَ أنَّ الدَّفقَ الكليَّ مِن النجومِ **كلِّها** في الكونِ هو غيرُ محدودٍ أيضاً!

لقد كان ذلك هو الاستنتاجَ المنطقيَّ الذي توصّلَ إليه أولبرز بافتراضاتِه الأساسية. وهكذا يتوجّبُ، وسواءٌ أكُنّا مُواجهينَ للشمسِ أم لا، أن تكونَ سماءُ الليلِ ساطعةً، وبشكلٍ لانهائيٍّ.

ولكنَّ سماءَ الليلِ مظلمةٌ. وهكذا فإنَّ هناك شيئاً ما مغلوطاً في التقديرِ الذي وصفناه. ولكنْ، أين هو الخطأ؟

إنَّ التأمّلَ الدقيقَ لكلِّ براهينِ أولبرز يُرينا فجوةً واحدة. إنَّ النجومَ ليست مصادرَ على شكلِ نِقاطٍ، بل إنَّ لها حجماً محدوداً. وهكذا فعندما نبتدئُ بوضعِ النجوم في قشراتٍ متتاليةٍ حول O، فلسوف نصِلُ، بالطبع، إلى مرحلةٍ تملأُ فيها النجومُ السماءَ المرئيةَ مِن قِبَلِ O كلَّها. وقد يُفيدنا أن نضربَ لذلك مثلاً. فلو نظرتَ عَبْرَ فجوةٍ ما بينَ الأشجارِ في مُنْتَزَهٍ ما، لأمكنكَ أن ترى المبانيَ في خلفيةِ المنظر. أمّا إذا كنتَ في وسَطِ غابةٍ مِن الأشجارِ فإنك، وبكلِّ بساطةٍ، لا يُمكنكَ أن تنظرَ إلى أبعدَ مِن مسافةٍ محدودة. إنَّ كلَّ الفجواتِ في أشجارِ الأرضيةِ الأماميةِ مغطّاةٌ في النهايةِ بصفوفٍ مِن الأشجارِ في المؤخّرة. ولذا فإننا حتى لو رسمْنا عدداً محدوداً مِن القشراتِ لتملأ الكونَ كلَّه، فإنَّ النجومَ الموجودةَ في القشراتِ القريبةِ نسبياً وحَسْب سوف تشاركُ في دَفقِ الإشعاعِ الكليّ. وهكذا فإنّ الدَّفقَ ليس غيرَ محدودٍ وإنما هو محدود.

ولكننا لسنا بمنجاةٍ مِن الخطرِ بَعْدُ! ذلك لأنَّ تدفّقَ الإشعاعِ الكليِّ المحدودِ هذا يمكنُ أن يُحْسَب، ولقد ثَبَتَ في النهايةِ بأنَّ ارتفاعَه قد يصلُ سطحَ الشمس. وهذا يعني أنَّ السماءَ يجبُ أن لا تكونَ ساطعةً وحسب، بل أن تكونَ أيضاً درجةُ حرارتِها قريبةً مِن



الشكل ٧,١٨: نرىٰ في مخطّطِ الزّمْكان spacetime diagram هذا خطوطَ وجودِ worldlines مصدرَيْن للضوء، وهما (a) و (b)، ويقعانِ علىٰ بُعدِ ٨ و١٢ بليون سنةٍ ضوئيةٍ عن الراصدِ (O). وتدلُّ الخطوطُ المتقطِّعةُ علىٰ مساراتِ الضوء. لاحظْ أنَّ الإشاراتِ الضوئيةَ المُبتَعَثَةَ مِن (a)، بَعْدَ ميلادِ الكونِ، يمكنُ أن تصلَ (O) قبلَ الحِقبةِ الحاليّةِ في (P)، ولكنَّ الإشارةَ مِن (b) لم تصلْ إلىٰ (O) بعدُ.

٥٥٠٠ درجةٍ مئويةٍ في كلِّ مكان، ومِن ضمنِ ذلك على مقرُبَةٍ منّا. وهكذا فلقد توصّلْنا إلى استنتاجٍ مستحيل.

ولقد اقترحَ الفلكيونَ، في الماضي، حَلّيْنِ آخَرَيْنِ لهذا التناقض. وأوّلُهما أنّ الكونَ قد لا يكونُ كما افترضَ أولبرز غيرَ محدودٍ، أو لانهائياً، وإنما هو محدودٌ. ويعني ذلك أننا عندما نرسمُ قشراتِنا الكرويةَ نتوقّفُ على بُعدٍ ما، حيثُ لا يوجدُ أيُّ شيءٍ بَعدَ ذلك. ويتوجّبُ أيضاً أن يكونَ هذا البُعدُ كَمَدىٰ أفضلِ مَراقبِنا، على الأقلّ. ذلك لأنه لا توجدُ نهايةٌ لمصادرِ الضياءِ، وإلى أبعدِ حَدٍّ يمكنُ أن يراهُ إنسانٌ، وإلى ما يَقْرُبُ مِن عشرةِ بلايين سنةٍ ضوئية، وهو أبعدُ ما يمكنُنا أن نَسْبُرَ غَوْرَهُ حتى الآن. وفي موقفٍ كهذا، فإننا نتوصّلُ فعلاً إلى حلٍّ لهذا التناقضِ، لأنَّ مشاركةَ المصادرِ الضوئيةِ التي هي بِمثْلِ هذه الأبعادِ السحيقةِ تافهةٌ ويمكنُ إهمالُها، بالمقارنةِ مع الضوءِ الذي يصلُنا مِن الشمس.

وأمّا الحَلُّ الآخَرُ فهو أنّ النجومَ التي نراها أو يمكنُ، مِن حيثِ المبدإ، أن نراها،

قد وُجِدَتْ قبلَ زمنٍ محدود. افرضْ أنّ الكونَ ذاتَه قد وُجِدَ قبلَ عشرةِ بلايينَ سنةٍ ضوئية. ويمكنُنا أن نستلمَ اليومَ، في هذه الحالةِ، الضوءَ الصادرَ مِن تلك النجوم التي تقعُ داخلَ مسافةِ عَشْرَةِ بلايينَ سنةٍ ضوئية فقط. وأمّا النجومُ التي هي أبعدُ مِن هذا الحَدِّ، فإنَّه لم يكنْ لضوئِها وقتٌ كافٍ للوصولِ إلينا بعدُ. ويوضحُ الشكلُ ٧,١٨ هذا السيناريو.

وهناك حلٌّ آخَرُ ممكنٌ للمتناقضةِ، وهو يأخذُ بنظرِ الاعتبارِ حقيقةَ أنّ النجومَ في أيّةِ قشرةٍ سوف تدومُ زمناً محدوداً. إنها لا يمكنُ أن تستمرَّ في إشراقِها إلى الأبد. ولقد رأيْنا في الفصلِ الثاني كيف أنّ أيَّ نجم يصلُ في آخرِ المطافِ نهايةَ مخزونهِ مِن الطاقة. وهكذا لا يمكنُنا أن نتوقّعَ العثورَ على نجوم تشعُّ في القشراتِ كلِّها إلى الأبد، وهو ما يقلّلُ، وبصورةٍ ملموسةٍ، مِن صافي مشاركتها في الدَّفقِ الكليِّ المستَلَم.

ولكلِّ هذه البراهينِ مظاهرُ غيرُ مُرْضِيَةٍ. وعلى سبيلِ المثالِ، فلو كانت فترةُ بقاءِ النجوم كلِّها محدودةً، فإنَّه في كونٍ لا حَدَّ لِقِدَمِهِ لن تبقىٰ هناك نجومٌ مشعّة، ما لم تكنْ ثَمَّةَ نجومٌ جديدةٌ تضافُ باستمرار. إنَّ كوناً جاءَ إلى الوجودِ قبلَ زمنٍ محدودٍ يُثيرُ أيضاً أسئلةً فلسفيةً وفكرية، وكذلك هي فكرةُ الكونِ المحدودِ الامتداد.

وعلى أيةِ حالٍ، فلقد تمَّ إهمالُ عنصرٍ جوهريٍّ في حسابِ أولبرز، وقد تمَّ الكشفُ عن ذلك في منتصفِ القرنِ العشرينِ فقط، عندما ناقشَ هرمان بوندي هذا الموضوعَ، في إحياءٍ لمتناقضةِ أولبرز. وسننظرُ الآن في ذلك الجزءِ مِن الدلالةِ الحاسمةِ حولَ الكونِ الحقيقيّ، وهو ما لَمْ يكنْ في متناولِ أولبرز. إنه الدليلُ الذي ينبني عليه علمُ الكونِ الحديث.

قانونُ هابل Hubble's Law

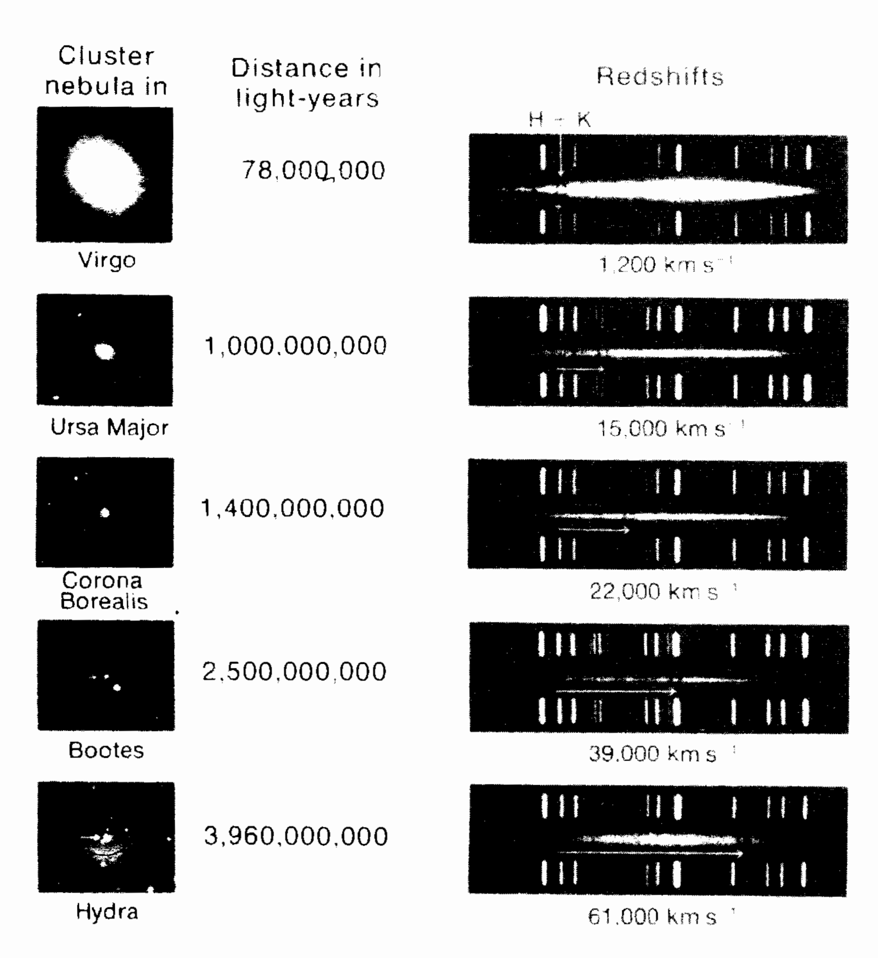
ابتدأت انطلاقةُ علمِ الفلكِ الحديثِ الحقيقيةُ، أي ذلك المبنيّ على الملاحظة، باكتشافِ إدوين هابل Edwin Hubble (الشكل ٧,١٩)، الذي أُعلِنَ عامَ ١٩٢٩، في بحثٍ له بعنوانِ «علاقةٌ بين المسافةِ والسرعةِ الشعاعية بين السُّدُمِ خارجَ المجرّات» A relation between distance and radial velocity among extragalactic nebulae، في محاضرِ الأكاديميةِ الوطنيةِ للعلوم، في الولاياتِ المتحدةِ الأمريكية. ولقد كان ما وجدَه هابلُ ثمرةَ أعوام عديدةٍ مِن البحوثِ على أطيافِ المجرّاتِ، والذي ابتدأهُ، مع ڤ.م. سلايفر، عامَ ١٩١٤. وحتى ندركَ مدى أهميةِ هذا الاكتشاف، فلننظرْ إلى الشكل ٧,٢٠.



الشكل ٧,١٩: إدوين هابل، وهو يقفُ أمامَ مِرقابِ بالومار شميدت، ويبلغُ قُطرُ مرآتِه ٤٨ إنجاً. وقد كان هذا المِرقابُ جاهزاً للعملِ قبلَ موتِ هابل بقليل.

ونجدُ في هذا الشكلِ صُوَراً لمجرّاتٍ عديدةٍ في عناقيدَ، على اليسارِ، الواحدة تحت الأخرى. وكلّما اتجهْنا نحو أسفلِ القائمةِ كلّما أصبحت المجرّاتُ أبهتَ وأصغرَ، وهو مؤشِّرٌ على أننا ننظرُ إلى مجرّاتٍ أبعدَ وأبعد. وتؤكدُ الأرقامُ التي تزوّدُنا بالأبعادِ الحقيقيةِ، وهي تتراوحُ بين ٧٨ مليوناً و٣٦٩٠ مليونَ سنةٍ ضوئية، هذا التَوَقُّعَ.

لقد أشرْنا، عند مناقشتِنا لموضعِ النجوم، في الفصلِ الثاني، إلى كيفيةِ إمكانِ استخدامِ بَهَتِ faintness نجم ما، لتقديرِ بُعدِه عنّا. وتنطبقُ القاعدةُ ذاتُها على المجرّات. وإذا افترضْنا بإنّ المجرّاتِ لا تختلفُ كثيراً في إضاءاتِها الذاتيةِ، فإننا نتوقّعُ أن تكونَ المجرّةُ الأبهتُ أبعدَ مِن المجرّةِ الأكثرِ سطوعاً، ويمكنُ أن نستخدمَ القياسَ الكميَّ لِبَهَتِها، لتقديرِ بُعدِها عنّا. وكذلكَ، وعلى أساسِ أنه إذا كانت كلُّ الأجسامِ ذاتِ الصنف الواحدِ، بالحجمِ ذاتِه، وأنَّ الأبعدَ منها يبدو الأبهتَ ضوءاً، فإنه يمكنُنا أنَ نُجريَ فحصاً مزدوجاً على المسافةِ المقدَّرة.



الشكل ٧,٢٠: نرىٰ في كلِّ زوجيْنِ مِن هذه الصُّوَرِ، مجرّةً في عنقودٍ إلىٰ اليسارِ، وطيفَها إلىٰ اليمين. كما نرىٰ بُعْدَ المجرّةِ، وسرعتَها الإشعاعيةَ (تحتَ كلِّ طيفٍ) مقدَّرَةً حَسَبَ تأثيرِ دوبلر ـ عن مرصد بالومار، مؤسسة كاليفورنيا للتقنية.

ولسوف نرى، فيما بعد، بأنَّ كلاًّ مِن هذينِ الافتراضيْنِ اللّذيْنِ يبدوانِ معقوليْنِ، يمكنُ أن يقودنا إلى الوقوعِ في الخطإ. ولكننا سوف نفترضُ صحّتَها، في الوقت الحاضر.

وإذا ما نظرْنا يميناً وجدْنا طيفَ كلِّ مجرّة. إنّ الطيفَ الفعليَّ يقعُ في الوسطِ، مع طيفٍ للمقارنةِ على الجانبيْنِ. والأخيرُ هو طيفٌ لمصدرٍ مختبريٍّ يُظهِرُ خطوطَ (الامتصاصِ) السوداء. ويحتوي الطيفُ الفعليُّ أيضاً على خطٍّ واحدٍ أو خطّيْنِ مُعتميْن، وهما يميلانِ نحو الأحمرِ (أطوالِ الموجاتِ الأطولِ) بالنسبة إلى خطوطِ الطيفِ المُقارَنِ

به. أي أننا نشهدُ مثالاً على **الإزاحةِ الحمراء redshift**، والتي واجهناها مِن قبلُ في الفصلِ الخامس. ولو فسَّرْنا ذلك على أنه حالةٌ لتأثيرِ دوبلر Doppler effect، فإنَّ بإمكانِنا أن نحسبَ سرعةَ المجرّةِ المبتعدةِ عنّا. وهذه هي السرعةُ المُعطاةُ تحت كلِّ طيف.

ومِن اليسير جداً فهمُ العَلاقةِ المستخدَمةِ لتقديرِ هذا التأثير.

إنَّ الإزاحةَ الحمراءَ، للخطِّ الطيفيِّ، تُقاسُ بلغةِ الامتدادِ الجزئيِّ الذي زادَ به طولُها الموجيُّ بالنسبةِ إلى ذلك الموجودِ في الطيفِ المُقارَنِ به. وهكذا، فإذا كان للخطِّ، في الأحوالِ الطبيعيةِ، طولٌ موجيٌّ يبلغُ ٥٠٠ نانومترٍ[١]، ولكنه يبدو في الطيفِ ذا طولٍ موجيٍّ مِن ٥٠٥ نانومترات، فإنَّ إزاحتَه ستكونُ عندئذٍ خمسةَ نانومترات. وتبلغُ هذه الإزاحةُ، باعتبارها جزءاً مِن طولِها الموجيِّ الأصليّ، ٥/٥٠٠، أي واحداً في المائة. وهذه هي الإزاحةُ الحمراءُ للخطّ.

وكيف تُستخدَمُ هذه المعلوماتُ لتقديرِ سُرعةِ الابتعاد؟ إنّ تأثيرَ دوبلرَ يحينُ أوانُه هاهنا، فالقاعدةُ التي يُعطينا إياها تأثيرُ دوبلر لهيَ بسيطةٌ فعلاً، فسُرعةُ الابتعادِ speed of recession تساوي **حاصلَ ضربِ الإزاحةِ الحمراء في سرعةِ الضوء**. وهكذا تكونُ سرعةُ الابتعادِ، في المثالِ السابقِ، واحداً في المائةِ مِن سرعةِ الضوء، أي ٣٠٠٠ كليومترٍ في الثانيةِ الواحدة.

ورغمَ أنَّ الشكلَ ٧,٢٠ لا يُظهرُ المُعطَياتِ الأولى التي جاءَ بها هابلُ في بحثِه الذي قدّمَه في عام ١٩٢٩، فإنه يُعطينا فكرةً عمّا وجدَه. لقد كان ما وجدَه عظيماً فعلاً، ذلك لأننا يمكنُنا أن نرى، حتى مِن خلالِ لمحةٍ سريعةٍ، بأنّ المجرّاتِ الأبعدَ تبتعدُ عنّا بصورةٍ أسرع. لقد وجدَ هابل علاقةً أكثرَ دِقّةً، وهي يمكنُ أن نصيغَها على الشكل التالي:

إنّ سرعةَ ابتعادِ مجرّةٍ ما بالنسبةِ إلينا تتناسبُ مع بُعدِها عنّا.

وبالاختصار، فلو كانت لدينا مجرتانِ اثنتان هما G_1 و G_2، وكانت الأخيرةُ تبعدُ عنّا ضعفَ بُعدِ الأولى، فإنَّ سرعةَ ابتعادِ G_2 عنا سوف تكونُ ضعفَ سرعةِ ابتعادِ G_1.

ولقد ظلّتْ هذه النتيجةُ صحيحةً، عندما قُمنا بعدئذٍ بتوسيعها إلى المجرّاتِ الأبعدِ والأبعد، وصارت تُعرَفُ بـ **«قانونِ هابل» Hubble's law**. ويخبِّرُنا هذا القانونُ بأنَّ سرعةَ

---

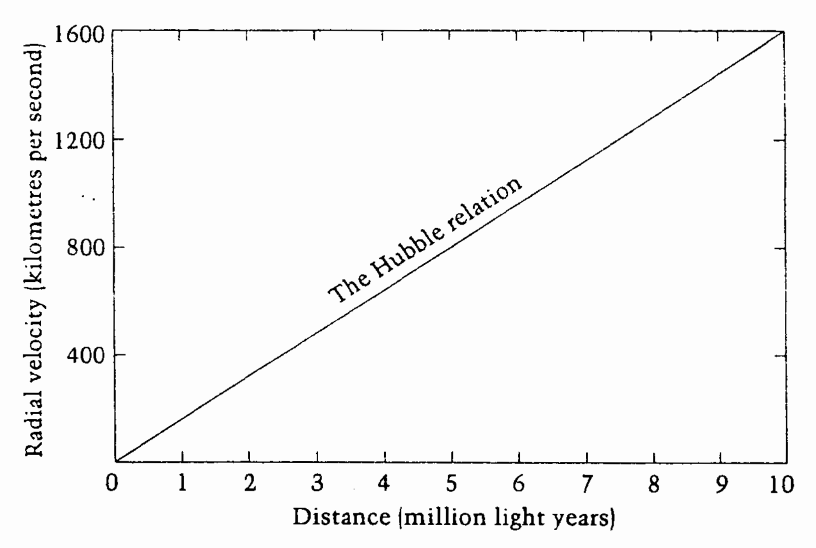
(١) النانومتر nanometre هو جزءٌ مِن بَليونِ جزءٍ من المِتر (10^{-9}m). د.س

ابتعادِ مجرّةٍ ما يتمُّ الحصولُ عليها بضربِ بُعدِها عنّا في قيمةٍ ثابتةٍ تُعرَفُ **بثابتِ هابل Hubble constant**. ولقد قَدَّرَ هابل بأنّ مجرّةً تقعُ على بُعدِ عشرةِ ملايينَ سنةٍ ضوئيةٍ، مثلاً، إنما هي تبتعدُ عنّا بسرعةٍ تَقرُبُ مِن ١٦٠٠كيلومترٍ في الثانيةِ الواحدة. ويُظهِرُ الشكلُ ٧,٢١ كيف تبدو هذه العلاقةُ ما بين السرعةِ (مبتعدةً عنّا بصورةٍ شعاعية) والمسافةِ، عندما نرسمُها على خطٍّ بيانيّ، ولكنَّ هابلَ، وكما سوف نرى بعدئذٍ، قد غالىٰ في تقديرِ هذا الثابت.

الكونُ المتوسعُ The Expanding Universe

لقد نَتَجَتِ النتيجةُ التاليةُ، في معناها الظاهريِّ، عن قانونِ هابل. إننا نرى المجرّاتِ تبتعدُ عنا حيثما وجّهْنا نظرَنا، والمجرّاتُ الأبعدُ عنّا هي التي تبتعدُ بِسُرَعٍ أكبر. فهل إنَّ ذلك يضعُنا، أي يضعُ مجرّةَ دربِ التبّانةِ، في موقعٍ خاصٍّ مِن العالَم؟ حتىٰ نُجيبَ علىٰ هذا السؤالِ فإنه لا مناصَ لنا هنا مِن أن نُلِمَّ بنظرةٍ تاريخية.

كان الاعتقادُ العامُّ، في الزمنِ القديم، وقبلَ آلافِ السنين، أنَّ الأرضَ تستقرُّ في سكونٍ وسطَ الكون، بينما تدورُ القُبّةُ السماويةُ حولَها. ولقد استمرّت الأهميةُ الخاصةُ



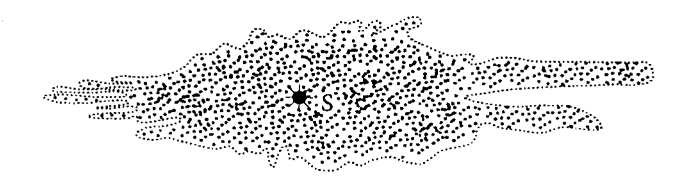
الشكل ٧,٢١: نرىٰ في هذا الرسمِ البيانيّ سرعةَ المجرّةِ (وقد تمَّ تقديرُها استناداً إلىٰ إزاحتِها الحمراء)، وبُعدَها عنّا، مُعَيَّنَيْنِ بالتعاقبِ علىٰ المحورَينِ العموديّ والأفقيّ. وتقعُ النقاطُ علىٰ الخطِّ المستقيم، والتي يُحدِّدُ انحدارُها علىٰ المحورِ الأفقيِّ قيمةَ ثابتِ هابل. والقيمةُ المستحدثةُ هنا هي تلك التي نَقَلَها هابلُ بالأصل، والتي نعلمُ الآنَ بأنها كانت أعلىٰ مِن اللازم.

التي تمتّعتْ بها الأرضُ حتى جاءَ القرنُ السادسُ عشر، عندما أثبتَتْ أبحاثُ كوبرنيكوس أنّ الشمسَ تشكِّلُ مركزَ منظومةِ الكواكبِ السيارة. وقام وليم هيرسكل، بَعْدَ قرنيْن، برسمِ خريطةٍ لمجرّتِنا مبنيّةٍ على دراساتِه للنجوم وأبعادِها التقديرية. ولقد وضعَ الشمسَ، في هذه الخريطة، في مركزِ المجرّة. وتظهرُ خريطةُ هيرسكل هذه في الشكل ٧,٢٢.

وهكذا، وحتى مع زحزحةِ الأرضِ عن مكانِها المميَّز، فإنه لا يزالُ بإمكاننا أن نفتخرَ بموقعٍ خاصٍّ تتمتّعُ به شمسُنا ومنظومتُها مِن الكواكبِ السّيارة. ولكنّ هذه المكانةَ الخاصّةَ التي تمتّعتْ بها الشمسُ تبدّدتْ، عندما تمَّ تثبيتُ صورةِ مجرّتِنا، والتي نراها في الشكل ٧,١٣، في مقتبلِ القرنِ العشرين، وكان هارلو شيبلي، في مرصدِ كليةِ هارڤارد، مسؤولاً عن إحداثِ الإدراكِ السليم والفهمِ الصحيح للأمر، والذي تكونُ الشمسُ بموجبِهِ بعيدةً عن مركز المجرّة. ويبلغُ التقديرُ الحاليُّ لبُعدِها عن مركز المجرةِ بحوالىٰ ٣٠٠٠٠ سنةٍ ضوئية.

وأمّا وقد تخلّيْنا عن المكانةِ الخاصةِ للشمسِ في مجرّتنا، فلقد انتقلتِ النظرةُ المَرْكَزيبَشَرّية[1] anthropocentric view إلى مستوىً آخر. هل إنَّ مجرّتَنا هي الجِرْمُ الأهمُّ في الكون؟ لقد كان الجوابُ، وحتى مع مُسْتَهَلِّ القرنِ العشرين، هو بالإيجاب.

ولقد اقترحَ إيمانوئيل كانت (١٧٢٤ ـ ١٨٠٤)، قبلَ قرنيْنِ مِن ذلك، فكرةً مُضادّةً، وهي تتلخّصُ في أنَّ ثمّةَ أنظمةً أخرى مِن النجومِ في العالَم تشبهُ مجرّتَنا، وأنها لا تختلفُ عنها إلاّ في أنّها، وبسببِ أبعادِها الشاسعةِ عنّا، لا يمكنُ أن نراها بصورةٍ منفصلة. ولقد أسموها بـ **«العوالِم الجُزُر» island universes**.

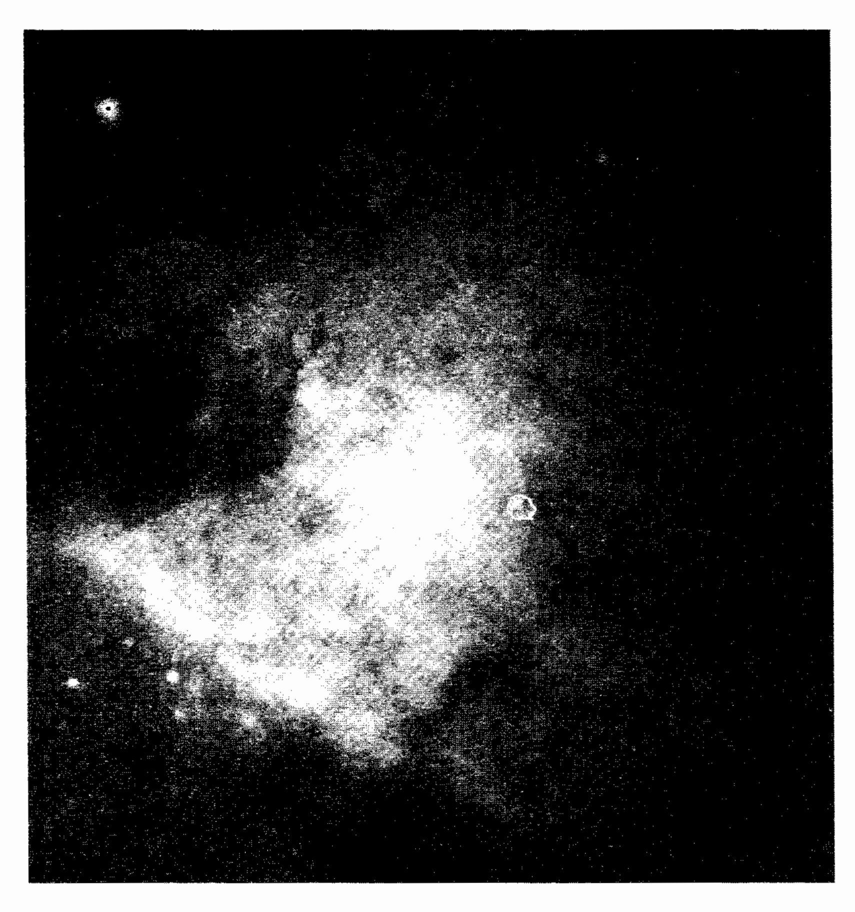


الشكل ٧,٢٢: قامَ وليم هيرشِل، في عام ١٧٨٥، برسمِ هذه الخريطةِ لمجرّتِنا. لاحِظْ أنَّ النجمَ المُشارَ إليه في الوسطِ هو الشمس.

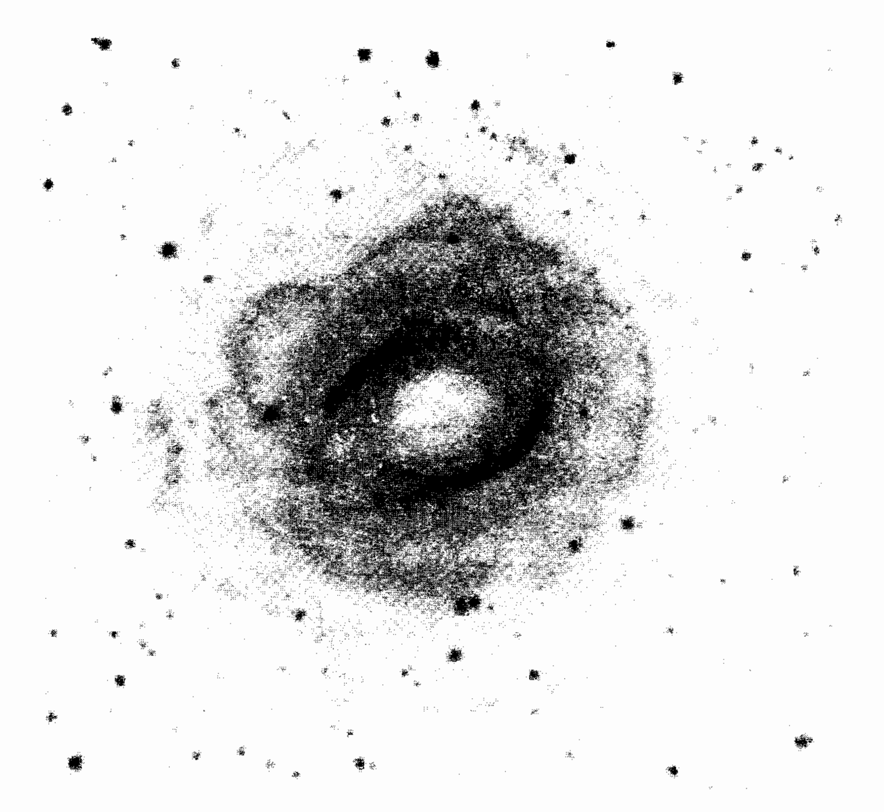
(١) مَرْكَزيبَشَرِيّ: anthropocentric view ـ مُعْتَبِرٌ أنّ الإنسانَ هو حقيقةُ الكونِ المركزية. مُفْتَرِضٌ أنَّ الإنسانَ هو غايةُ الكونِ القصوى، مُفَسِّرٌ كلَّ شيءٍ بلغةِ القِيَمِ والخبراتِ الإنسانية ـ المورد.
ـ anthropo= ـ anthro= الإنسان. د.س

ولكنَّ فكرةَ «كانْت» كانَتْ متقدّمةً على زمنِها بكثير، ولمْ تجدْ مَن يسلِّمُ بها إلاّ القليل. ونرى في الأشكال ٧,٢٣ ـ ٧,٢٥، بعضَ السُّدُم، أي صُوَراً تشبهُ السُّحُبَ، وهي مضيئةٌ، ولكنها ليست مصادرَ مركَّزةً للضوءِ كالنجوم. وإننا لنعلمُ اليومَ بأنّ السُّدُمَ الظاهرةَ في الشكليْنِ ٧,٢٣ و٧,٢٤ تقعُ ضمنَ مجرّتنا، بينما أنّ السديمَ الذي يظهرُ في الشكلِ ٧,٢٥، وكذلك سديمُ الأندروميدا، في الشكل ٧,١٤، إنما هي في حقيقةِ الأمرِ مجرّاتٌ خارجيةٌ تقومُ بذاتِها.

ولكنَّ الجَدَلَ تركَّزَ، حتى في القرنيْنِ الثامن عشرَ والتاسع عشر، على أبعادِ بعضِ مِن هذهِ السُّدُم، وخصوصاً تلك التي لا يبدو أنها تقعُ في قرصِ مجرةِ دربِ التبّانة.

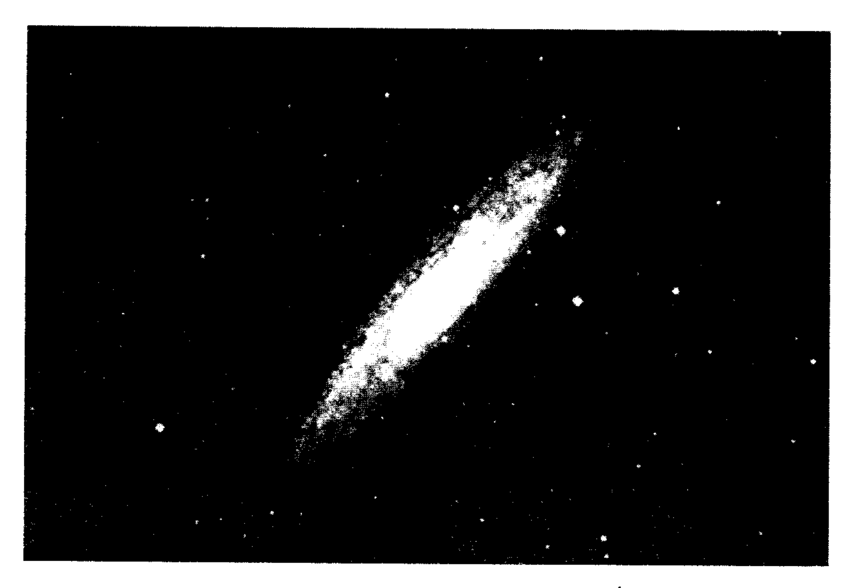


الشكل ٧,٢٣: فُسيفساءٌ مِن ٤٥ صورةً لسديم أوريون Orion Nebula، وهي قد وُضِعَتْ معاً حتى تصِفَ هذه المنطقةَ التي تشبهُ السَّحابة.



الشكل ٧,٢٤: صورةٌ ملتقطةٌ بجهاز ازدواج الشُّحنة charge coupled device (CDD)، للسديم الحَلَقِيِّ Ring Nebula. وبينما تشبهُ الصورةُ التي تظهرُ في الشكلِ ٣,١١ الصُّوَرَ التقليديةَ للسديم، فإنَّ هذهِ الصورةَ تُظهِرُ تفاصيلَ أكثرَ مِن ذلك بكثير.

ومثلما فعلَ كانت، فلقد جادلَ الرياضيُّ جوهان لامبرت (١٧٢٨ ـ ١٧٧٧) بأنَّ بعضَ هذه السُّدُمِ يقعُ خارجَ المجرّة، باعتبارِها مجراتٍ قائمةً بذاتِها. وقام ر. پروكتور (١٨٣٧ ـ ١٨٨٨) بتقديمِ تفسيرٍ يعضدُ أفكارَ كانْتُ ـ لامبرت، واقترحَ بأنَّ السببَ في عدمِ وجودِ سُدُمٍ شبيهةٍ في قرصٍ دربِ التبّانةِ هو الغبارُ الذي يمتصُّ الضوءَ المارَّ في مستوى القرصِ، بينما لا تحدث إعاقةٌ كبيرةٌ للضوءِ الذي يسيرُ بصورةٍ عموديةٍ على القرص. ولقد اتضحَ في نهاية المطافِ صحّةُ هذا التفسير. وعلى الرغمِ مِن ذلك، وفي عامِ ١٩١٩، فلقد كان لدى هارلو شيبلي ما يقولُه، وهو نفسُه مَن قامَ، عن حقٍّ، بوضعِ الشمسِ في المجرّة:



الشكل ٧,٢٥: مجرّةٌ في «النّحاتِ» NGC 253 و Sculptor ـ عن مرصدِ بالومار، مؤسسة كاليفورنيا للتقنية.

إنّ مراقبةَ ومناقشةَ السرعاتِ الشعاعية، والحركاتِ الداخلية، وتوزيعِ السُدُم اللولبية والسطوعِ الحقيقي والظاهري للمستسعرات novae، والإضاءاتِ القُصوىٰ لنجوم المجرّاتِ وعناقيدِ النجوم، وأخيراً أبعاد منظومةِ مجرّتِنا، يبدو أنها كلّها تُضادُّ فرْضيةَ «العالَمِ الجزيرة» Island Universe للسُّدُمِ اللولبية..

ولقد تبيَّنَتْ بعدَ ذلكَ بزمنٍ قصيرِ الصورةُ الصحيحة، مرّةً أخرى، عندما صارَ بإمكانِ هابل أن يؤكّدَ، وبفضلِ المِرْقابِ ذي المائةِ إنج، في جبل ويلسون، عامَ ١٩١٧، الفرْضيةَ الكانتيّة (نسبةً إلى كانْت) في أنَّ السُّدُمَ اللولَبيةَ كتلك التي تظهرُ في الشكل ٧,١٤ إنما تقعُ خارجَ المجرّات. وهكذا فلقد فقدَتْ مجرّتُنا مكانتَها المتفرّدةَ والبارزةَ في العالَم!

وعلى تلك الخلفيةِ صِرْنا ننظرُ فيما قد وجدَهُ هابل نفسُه، وهو ما بدا وكأنّه يضعُ مجرّتَنا، مرّةً أخرى، في موقعٍ خاصٍّ ـ حيثُ تبتعدُ المجرّاتُ الأخرى كلُّها عنها. ولكنَّ استعادةَ ذلك المجدِ لمْ تكنْ إلاّ فورةً لم تدُمْ طويلاً، إذ سَرعانَ ما صارَ مِن الواضح، استناداً إلى طبيعةِ قانونِ هابل الرياضية، بأنَّه قد تعامَلَ مع المجرّاتِ كلِّها بصورةٍ متماثلة. وهكذا فلو قُمنا بتجربةٍ فكريةٍ، ووضعْنا أنفسَنا في مجرّةٍ أخرى، وراقبْنا الكونَ مِن هناكَ، لوجدْنا الموقفَ ذاتَه: فكلُّ المجرّاتِ تبتعدُ عن موقعِنا الممتاز. ويبيّنُ الشكلُ ٧,٢٦ كيفية حدوثِ ذلك.

وحقّاً، فإنَّ الطريقةَ الصحيحةَ للنظرِ في هذا الموقف هي أن نتصوّرَ الفضاءَ كلَّه، والذي تنطمرُ فيه المجرّاتُ، على أنه آخِذٌ في التوسّع. ويمكنُ تشبيهُ الأمرِ، بالنسبة إلى شخصٍ ذوّاقةٍ، بعمليةِ خَبْزٍ لقطعةٍ مِن الكَعْك حاويةٍ على حبوبِ البُنْدُق. إنك عندما تخبزُ قطعةَ العجينةِ فإنّها تنتشر، وكذلك فإنّ البُنْدُقَ المطمورَ فيها يبتعدُ بعضُه عن بعض.

وهكذا فإنّ مِن الطبيعيِّ أن نصلَ إلى استنتاجٍ مِن قانونِ هابل بأنّ **الكونَ آخِذٌ في التوسّع**.

علاقةُ الإزاحةِ الحمراء ـ المسافة

لقد كان ذلك، بالفعل، استنتاجاً رائعاً ومتميّزاً، وهو ما بَيَّنَ بأنَّ الكونَ لا يتميّزُ بالتغيّرِ المستمرِّ، بالمقياس الأكبرِ، وحَسْب، ولكنَّ حركتَه تملكُ أيضاً نمطاً محدَّداً جدّاً. ورغمَ أنَّ ملاحَظاتِ هابل في عشريناتِ وثلاثيناتِ القرنِ العشرين كانت محدودةً بمسافاتٍ لا تكادُ تَزيدُ علىٰ ١٠٠ مليون سنةٍ ضوئية، فقد بذَلَ الفلكيون وسعَهُم في توسيع مسحِ المجرّاتِ هذا إلىٰ أبعادٍ أكبر. ولقد استُخْدِمَتْ، منذُ زمنِ هابل، أحسنُ مَراقبِ الأرضِ للتحققِ مِن أنَّ القانونَ ينطبقُ علىٰ إزاحاتٍ للأحمرِ أكبرَ وأكبر. ويعني ذلك أنّ علىٰ المرءِ أن يتحقّقَ مِن إن كانت المجرّاتُ ذاتُ الإزاحاتِ الحمراءِ الأكبرِ هي أبهتُ فعلاً، وهو ما

G1 G0 G2
100 km/second At rest 200 km/second

G1 G0 G2
At rest 100 km/second 200 km/second

الشكل ٧,٢٦: تخيَّلْ أننا نُراقب المجرّتيْنِ G_1 و G_2، في جهتينِ متعاكستيْنِ مِن موقعِنا الذي هو G_0. افرضْ أنَّ G_2 أبعَدُ بمرّتيْنِ عنّا مِن G_1، وأنَّ المجرّةَ G_1 تبتعدُ عنا بسرعةِ ١٠٠ كيلومترٍ في الثانية. وعندئذٍ، وحَسَبَ قانونِ هابل، فإنَّ G_2 ستكونُ مبتعدةً عنا كما هو مُبَيَّنٌ، وبسرعةِ ٢٠٠ كيلومترٍ في الثانية. ولو ذهبْنا الآنَ إلىٰ G_1 ونظرْنا مِن هناك، فإنَّ علينا أن نصحّحَ حركتَها بالنسبةِ إلىٰ G_0. وهكذا فإننا من G_1 سوف نرىٰ G_0 وهي تبتعدُ عنا بسرعةِ ١٠٠ كيلومترٍ في الثانية، و G_2 مبتعدةً بسرعةِ ٣٠٠ كيلومترٍ في الثانية، وكما هو ظاهرٌ في الخطِّ الأسفلِ من الشكل. ولكنْ بُعْدَ G_2 عن G_1 يبلغُ ثلاثةَ أضعافِ بُعْدِ G_0 عن G_1. وهكذا فإنَّ قانونَ هابل يسري علىٰ موقعِ الرصدِ أيضاً.

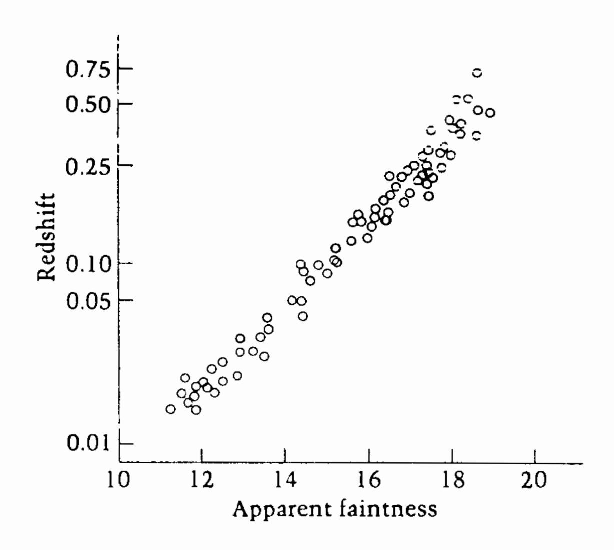
وجدَهُ هابل بالنسبةِ إلى المجراتِ القريبةِ منا. ويبيِّنُ الشكلُ ٧,٢٧ لنا كيف تبدو علاقةُ الإزاحةِ الحمراءِ ببَهَتِ صنفٍ خاصٍ مِن المجرّات. إنَّ كلاًّ مِن هذه المجراتِ هي عضوٌ مِن الدرجةِ الأولىٰ في عناقيدِها، أي أنها الأكثرُ سطوعاً في مجرّاتِها الخاصّةِ بها. ولماذا هو اختيارُ صنفٍ خاصٍّ كهذا؟

نحن نتذكرُ مِن الفصلِ الثاني بأننا لو نظرْنا إلىٰ كلِّ مصادرِ الضوءِ التي هي مِن نوعٍ واحد، كالنجومِ أو المجرّاتِ، مِن أبعادٍ مختلفةٍ، فإنّ تلك التي تبدو فيها الأبهتَ هي الأبعدُ عنّا. وهذه عقيدةٌ أساسيةٌ يبني الفلكيُّ عليها تقديراتِه للأبعاد. ولكنَّ الأمرَ لا يخلو هنا مِن مأزق، فلو كان الجسمُ A، في ذاتِه، أقلَّ قوّةً في إشعاعهِ للطاقةِ مِن الجسمِ B، فإننا سوف نجدُ بأنّ A يبدو، علىٰ المسافةِ ذاتِها، أبهتَ مِن B، ولسوفَ نستنتجُ خطأً بأنه أبعدُ مِن B. وللوصولِ إلىٰ مقارنةٍ صحيحةٍ للأبعاد، يتوجبُ علينا التأكدُ مِن أنّ المصادرَ **كلَّها متساويةُ القوةِ**.

وقد لعبَ آلان سانديج، الذي كان يقوم بإجراءِ بحوثٍ تحت إشرافِ هابل، دوراً رائداً في توسيعِ قانونِ هابل إلىٰ مسافاتٍ أبعدَ وأبعد. وباستخدام عناقيدَ ذاتِ أبعادٍ معروفة، فلقد وَجَدَ سانديج أنَّ المجرّةَ مِن الدرجةِ الأولىٰ، في أيِّ عنقودٍ، تمتلكُ إضاءةً لا تختلفُ كثيراً عن إضاءةِ أيّةِ مجرّةٍ مشابهةٍ في عنقودٍ آخر. وهكذا فإذا ما اخترنا مجرّات كهذه مِن عناقيدَ مختلفةٍ، فإنَّ بَهَتَ المجرّةِ المرصودة سيُعطينا تقديراً موثوقاً لبُعدِها عنّا. ويُؤكدُ الشكلُ ٧,٢٧ هذا التوقّعَ، لأننا نجدُ أن التبعثرَ scatter، حولَ خطٍّ يمرُّ عَبْرَ النِقاط، قليلٌ جدّاً.

وهذا هو السببُ في أنّ الفلكيينَ صاروا يعتبرونَ الإزاحةَ الحمراء علىٰ أنّها مؤشّرٌ علىٰ بُعْدِ الجِرْمِ الذي يقعُ خارجَ المجرّةِ، كالمجرّةِ أو الكوازار. ويقول حُكْمُ التجربةِ، أي ذلك الحكمُ المبنيُّ علىٰ الخِبرةِ العمليةِ لا المعرفةِ العلمية، بأنْ تضربَ الإزاحةَ الحمراءَ في مقياسِ بُعْدٍ ثابتٍ حتّىٰ تحصلَ علىٰ قيمةٍ تقريبيةٍ لبُعْدِ الجِرْمِ عنّا. كما أنّ مقياسَ البُعدِ الثابتِ بدورِه تحدِّدُه قيمةُ ثابتِ هابل Hubble's constant. ولكنْ، ما هو مِقياسُ البُعدِ هذا؟

لقد أشرْنا إلىٰ تقديراتِ هابل نفسِه لمقياسِ البُعدِ هذا علىٰ أنه مغلوط. لقد كانت هناكَ أخطاءٌ منهجيةٌ عديدةٌ في القياساتِ الأولىٰ، وهي المسؤولةُ، وإلىٰ حدٍّ كبير، عن ذلك. وعندما زادتْ قابليتُنا علىٰ فهم طبيعةِ تلك الأخطاء، فلقد تناقصتْ قيمةُ ثابتِ هابل



الشكل ٧,٢٧: خطٌّ بيانيٌّ للإزاحاتِ الحمراء قُبالَةَ بَهَتِ المجرّات، ويُرينا خطّاً مستقيماً تقريباً عندما تكونُ نماذجُ المجرّاتِ متألفةً مِن العضواتِ الأكثرِ سطوعاً في عناقيدها الخاصةِ بها.

باستمرارٍ، ومع مرورِ السنين. وما هي نسبةُ هذه القيمةِ إلىٰ قيمةِ ثابتِ هابل التي نراها في الشكل ٧,٢١؟ إنَّ قِيَمَنا الحاضرةَ سوف تضعُ مجرّةً تبتعدُ عنّا بسرعةِ ١٦٠٠ كيلومترٍ في الثانيةِ علىٰ بُعْدٍ يتراوحُ ما بينَ ٦٠ إلىٰ ٧٥ مليونَ سنةٍ ضوئيةٍ عنّا، مُقارَنةً بـ ١٠ ملايينَ سنةٍ ضوئيةٍ تقريباً حَسَبَ تقديرِ هابل.

ولسوءِ الحظِّ، ورغمَ مرورِ سبعةِ عقودٍ تقريباً علىٰ بحثِ هابل الأصليِّ، فإنَّ الفلكيينَ لم يتمكنوا مِن تثبيتِ قيمةِ ثابتِ هابل ضمنَ حدودٍ يُعَوَّلُ عليها، أي ضمنَ حدودٍ للخطإِ لا تزيدُ علىٰ ١٠٪، ويُكثِرُ العلماءُ مِن ترديدِ قولِهم «لو» و«لكن»، في قياساتهم، فكانت عاقبةُ ذلك أنهم لم يتمكنوا مِن الاتفاقِ علىٰ قيمةٍ يمكنُ أن نعتبرَها القيمةَ «الحقيقيةَ» لثابتِ هابل.

ولو قسمْنا سرعةَ الضوءِ علىٰ ثابتِ هابل، لحصلْنا علىٰ مقياسٍ للمسافةِ. وبسببِ الشكِّ في مدىٰ قيمةِ ثابتِ هابل، فإنّ مقياسَ المسافةِ هذا، وإلىٰ حدٍّ ما، هو غيرُ أكيدٍ أيضاً. ولسوف نستخدمُ هنا قيمةً تُعادلُ عشرةَ بلايينَ سنةٍ ضوئية، لمجرّدِ تثبيتِ الأفكار. إنَّه عددٌ تقريبيٌّ يُنبئُنا بمقياسِ الأبعادِ الكونية. وكما ذكرْنا سابقاً، فإننا نحصلُ علىٰ فكرةٍ عن بُعْدِ مجرّةٍ ما عنّا بضربِ مقياسِ البُعْدِ هذا في الإزاحة الحمراءِ للمجرّة.

عودةٌ لمتناقضةِ أولبرز

ونعودُ الآنَ إلىٰ ذلك السؤالِ البسيطِ الذي سأله أولبرز: لِـمَ هي السماءُ مظلمةٌ في الليل؟ ذلك لأنه قد صارَ في حوزتِنا الآنَ عنصرٌ جديدٌ، من المعلوماتِ حولَ الكون، مِمَّا لم يكنْ مُتاحاً لأولبرز ومعاصريه. نحن نعلمُ بأنَّ الكونَ يتوسّع، وأنَّ الضوءَ الآتيَ مِن أيِّ مصدرٍ خارجَ المجرّةِ تحدثُ له إزاحةٌ حمراء.

إنّ الإزاحةَ الحمراءَ تعملُ بطريقتيْنِ مختلفتيْنِ لتقليلِ مشاركةِ المصادرِ الأبعدِ في خلفيةِ الإشعاعِ الموضعيّ. وأولاً، نحن نتذكرُ، مِن الفصلِ الخامس، بأنَّ الإزاحةَ الحمراءَ تُشيرُ إلىٰ معدّلاتِ جريانِ الوقتِ في المصدرِ والمتلقّي. ورغمَ أنّ ذلكَ قد لوحظَ في مجالِ الإزاحةِ الحمراءِ الناجمةِ عن الجاذبية، فإنَّ هذا التأثيرَ يصدُقُ علىٰ أيّةِ إزاحةٍ حمراء، وكما وجدَ هابل. ولو كانت الإزاحةُ الحمراءُ تبلغُ ٠,٥، فإنَّ الساعة التي يحملُها الراصدُ ستسيرُ مَرَّةً ونصفَ المرّةِ بأسرع مِن تلك الموجودةِ في المصدر. أي أنّ فترةً زمنيةً من ثانيةٍ واحدةٍ في المصدرِ تُقابلُ فترةً تبلغُ ١,٥ من الثانية لدىٰ الراصد، لو أقمْنا ترتيباتٍ للإشارة مِن المصدرِ إلىٰ الراصد. وهكذا، فإنَّ معدّلَ استلامِ الإشعاعِ مِن قِبَلِ الراصدِ سيحتاجُ إلىٰ إنقاصِه بعاملِ ٢/٣ عن تقدير مشاركةِ المصدر.

وثانياً، فإنَّ الإشعاعَ ذاتَه يتمُّ تخفيضُ طاقتِه، عند مسيرِه خلالَ الكونِ المتوسع. إنه يتألفُ مِن كَمَّاتٍ quanta ضوئيةٍ تُدعىٰ بالفوتونات photons، ولكلِّ فوتونٍ طاقةٌ تتناسبُ مع تردّدِه. إنّ الإزاحةَ الحمراءَ تكونُ قد قلّلتْ مِن تردّدِ الفوتونِ عند وصولِه إلىٰ الراصد، ولذا فإنّ الأخيرَ يستلمُ كمّاً أقلَّ مِن الطاقة. وفي المثالِ المذكورِ أعلاهُ، لا يستلمُ الراصدُ سوىٰ ثلثيِّ طاقةِ الفوتونِ التي يشعّها المصدر.

وإذا ما نظرْنا إلىٰ هذينِ التأثيرينِ معاً، لوجدْنا بأنَّ مشاركةَ مصادرِ الضوءِ الأبعدِ في سطوعِ brightness السماءِ هي أقلُّ بقليلٍ مِمَّا قدّره أولبرز. وفي إزاحةٍ حمراءَ يبلغُ مقدارُها ٠,٥، فإنَّ الانخفاضَ يكونُ بعاملٍ قدرُه ٩/٤، وفي إزاحةٍ حمراءَ تبلغُ واحداً يكونُ الانخفاضُ بعاملٍ مِن ٤/١، بينما قد يصلُ الانخفاضُ في إزاحةٍ حمراءَ مقدارُها (٩) إلىٰ واحدٍ في المائة. وكلّما زادَ ابتعادُ المصدرِ كلّما عَظُمَ فقدانُ مشاركتِه في خلفيةِ الإشعاعِ القريبةِ منّا. وهذا هو السببُ في كونِ كميةِ الإشعاعِ الكلّيةِ التي يستلمُها الراصدُ كميةً تافهة.

وهكذا يتّضِـحُ بأنَّ توسُّعَ الكونِ هو سببٌ رئيسيٌّ في بقاءِ سماءِ الليلِ مظلمةً!

نماذجُ الانفجارِ الكبير The big bang models

لقد أظهرَت لنا متناقضةُ أولبرز كيف أنّ سؤالاً بسيطاً نسبياً يمكنُ أن يؤدِّيَ إلىٰ ظهورِ مفاهيمَ كونيةٍ عميقةٍ، مِثْل فكرةِ توسّعِ الكون. وبالنسبةِ إلى أكثرِ الناسِ، فإنَّ فكرةَ الكونِ المتوسّعِ لهيَ أمرٌ يدعو إلىٰ الشعورِ بالرَّوْعِ والرهبة. وإذا ما واجهْنا هذا الاكتشافَ البارزَ، فلسوفَ تُثارُ أسئلةٌ عديدة. إذ ما هو المَدىٰ الذي يتوسّعُ إليهِ الكونُ؟ وما الذي يوجدُ خارجَه؟[1] وهل إنَّ توسُّعَه سوف يستمرُّ إلىٰ الأبد؟ أم إنَّه سوف يتوقّفُ ثمَّ يعودُ إلىٰ الانكماش؟ وإذا كان الكونُ يتوسّعُ، وكان أصغرَ حجماً في الماضي، فهل كان هناك حينٌ مِنَ الدَّهرِ كان فيه أصغرَ مِن ذلك بكثيرٍ، **وحتىٰ بقَدْرِ النقطةِ وبحجم يبلغُ الصِّفر؟ (point-like with zero volume?)**، وهل إنه وُلِدَ علىٰ تلك الحالةِ؟ وإذا كان الأمرُ كذلك، فماذا كان عليه الحالُ قَبْلاً[2]؟

إنَّ للأسئلةِ التي طرحَها المفكرون منذ آلافِ السنين، مِمَّا قد أشرْنا إليه في بداية هذا الفصل، صدىً في الأسئلةِ الحديثةِ التي تُثارُ حول الكون.

ولكنَّ علماءَ الكونِ، وحتىٰ يجيبوا علىٰ تلك الأسئلةِ، يستمدّونَ العونَ مِن قوانينِ العلم الثابتةِ، وخصوصاً تلك التي قد تتعلّقُ بالبِنىٰ الهائلةِ في العالَم. ومِن خلالِ مناقشاتنا السابقةِ في هذا الكتابِ نرىٰ أنَّ أكثرَ تفاعلٍ مُناسبٍ ووثيقِ الصلةِ بالموضوعِ هنا هو الجاذبيةُ. والجاذبيةُ هي أقوىٰ ما يكونُ حيثُما وُجِدَتِ الكُتَلُ الكبيرة، وهي منتشرةٌ وعامّةٌ في كلِّ مكان. ولقد رأينا أنَّ تفسيرَ آينشتاينَ نفسَه كان ابتدأ ذلكَ، في عام ١٩١٧، عندما اقترحَ أنموذجاً للكونِ مستقرّاً static، ومتجانساً homogenous، ومُوَحَّدَ الخواصِّ، أي متساوي الخصائصِ في جميعِ الجهات isotropic. ونعني بالمتجانسِ أنَّ العالَمَ يبدو هو ذاتَه في نقاطِ المكانِ كلِّها. وأمَّا الأنموذجُ «الموَحَّدُ الخواصّ»، فنعني به أنَّ العالَمَ يبدو متشابهاً في كلِّ الاتجاهات. وبعبارةٍ أخرىٰ، فلو أُخِذْتَ إلىٰ أيِّ جزءٍ مِن العالَم، فإنك لن تجدَ أيَّ مَعْلَمٍ landmark يَدُلُّكَ علىٰ مكانك، ولا أيَّ اتجاهٍ موضعيٍّ يُنَبِّئُكَ بالجهةِ

---

(١) ﴿بسم اللّه الرحمن الرحيم. الحمد للّه رب العالمين﴾ [الفاتحة: ١ و٢]. صدقَ اللّهُ العظيم. لقد قال الحقُّ سبحانَه وتعالىٰ، في أوّلِ ما نقرأ في كتابِ اللّهِ، وفي كلِّ صلاةٍ، بعد البسملة ثمَّ الحمدِ للّهِ، بأنه ربُّ العالمين ـ إنَّه ربُّ عوالِمَ عديدةٍ، لا يعلمُها إلاَّ هو، لا عالَم واحدٍ. د.س

(٢) وسنظلُّ مردّدين خاشعين: ﴿وما أوتيتم من العلم إلاَّ قليلاً﴾ [الإسراء: ٨٥]. صدق اللّه العظيم. د.س

التي أنت ناظرٌ إليها. لقد ساعَدَتْ هذه الافتراضاتُ المبسَّطَةُ علىٰ حلِّ معادلاتٍ شائكةٍ في النسبية. ولحُسْنِ الحظِّ، فإنَّ العالَمَ يبدو متجانساً فعلاً، ومُوَحَّدَ الخواصِّ، علىٰ مقياسٍ كبيرٍ يفي بالغرض.

ولِعالَم آينشتاينَ خصيصةٌ أخرىٰ، إذ إنه **مُغْلَقٌ closed**. وذلك يعني أنّكَ لو أضأتَ مصباحاً يدَوياً وأرسلتَ بأشعّةٍ للضوء، فإنها سوف تظَلُّ تسيرُ حَوْلَ العالَم بسببِ الحَنْيِ الجاذبيِّ gravitational bending، ثمّ هي تعودُ إلىٰ النقطةِ الأصليةِ مِن الخلف! ويبيِّنُ الشكلُ ٧,٢٨ الفكرةَ الهندسيةَ الخاصّةَ بذلك. إنَّ الكونَ المغلَقَ يملكُ حجماً محدوداً، ولكن مِن دونِ حدود a closed universe has a fenite volume but no boundary.

ولكنَّ أُنموذجَ آينشتاينَ فقَدَ شعبيته حالما صارَ معلوماً بأنَّ الكونَ ليس ثابتاً، بل إنه آخِذٌ بالتوسّع not static but expanding. وهكذا فلقد توجّهَ علماءُ الكونِ إلىٰ النماذجِ التي تصفُ كوناً متوسعاً expanding universe. وقبلَ سنواتٍ قلائلَ مِن اكتشافِ هابل، قامَ علماءُ عديدونَ باقتراحِ أمثالِ هذه النماذج، والتي كان يُنظَرُ إليها في بدايةِ الأمرِ علىٰ أنها مجرَّدُ نوادرَ رياضية. وهكذا صارت نماذجُ عالِم الكونِ الروسيِّ ألكسندر فرايدمان، والبلجيكيِّ آبي ليمايتر، والأمريكيِّ هـ.ر .روبرتسون، نقاطَ انطلاقٍ لوصفِ علمِ الكونيات cosmology.

ويتضمّنُ أبسطُ هذه النماذجِ أنواعاً ثلاثةً. والنوع الأوّلُ منها هو كونٌ ذو فضاءٍ يبلغُ انحناؤه صفراً zero - curvature، وأمّا الثاني منها فهو كونٌ يمتلكُ مكاناً ذا انحناءٍ موجَب positive - curvature space، بينما أنَّ المكانَ في النوعِ الثالثِ ذو انحناءٍ سالب negative - curvature space (انظرْ الفصلَ الخامسَ حولَ مناقشةٍ لانحناءِ المكان). إنَّ السلوكَ المتغيِّرَ لهذه النماذجِ كلِّها يشتركُ في مظهرٍ واحد. إنه يُنبئُنا بأنّ توسُّعَ الكونِ لم يكنْ أبطأَ في الماضي عما هو عليه اليومَ. وهكذا فلقد كان للكونِ حجمٌ أصغرُ وأصغرُ في الماضي، وكان حجمُه صفراً، في حِقبةٍ زمنيةٍ معيّنة. وتُعرَفُ هذه الحِقبةُ الزمنيةُ بحِقبةِ **الانفجارِ الكبير big bang** epoch. ولقد كان العالَمُ، في تلك الحقبةِ، منفجراً بسرعةٍ لا حدودَ لها exploding with infinite velocity، وكان في حالةِ كثافةٍ وحرارةٍ لانهائيتيْنِ. إنَّ التوسّعَ الذي نشهدُه اليومَ هو بقيةٌ من ذلك الانفجارِ العملاق. وهل توجَدُ ثَمَّةَ أيّةُ بقايا أو آثارٍ أخرىٰ ماديّةٍ ملموسةٍ لذلك؟ لسوف نتناولُ هذا الموضوع عندما يحينُ وقتُه.

﴿والسماء بنيناها بأييد وإنّا لموسعون﴾

[الذاريات: ٤٧]

مِن معجزاتِ هذه الآية الكريمة

(١) إنَّ «السماءَ»، هنا، تُشيرُ إلىٰ **الكون** ذاتِهِ، ليسَ غَيْرُ، فهي لا تُشيرُ إلىٰ جوِّ الأرضِ، ولا إلىٰ جِرْمٍ بذاتِه، كما أنها غيرُ مخصَّصَةٍ بالسماءِ الدنيا أو واحدةٍ مِن السماوات العُلىٰ، أي أنها تُشيرُ إلىٰ الكونِ كله[1].

(٢) وقولُه تعالىٰ «بنيناها»، بصيغةِ الماضي، يُشيرُ إلىٰ وجودِ **بداية للخَلْق**، فليس هذا الكونُ مِن دونِ نهايةٍ وبدايةٍ كما قد ظنَّ الجاهلون. فلقد صار وجودُ بدايةٍ لِخَلْقِ الكون، أمراً لا يختلفُ حولَه اثنانِ مِن العلماءِ، ولا يَشُذُّ عن ذلك أحَدٌ أبداً.

(٣) والبدايةُ تَدُلُّ علىٰ أنْ لا شيءَ قد وُجِدَ قبلَها، فهو خَلْقٌ، أي إيجادٌ مِن العَدَم. ولا يُجادِلُ عاقلٌ في أنَّ ذلك لا يكونُ إلاَّ مِن اللَّهِ الخالقِ. وفي ذلك **إثباتٌ للخالقِ سبحانه**.

(٤) كما تَدُلُّ الآيةُ الكريمةُ علىٰ نهايةِ الكونِ، أي قيام **قيامتِه**، إذ إنَّ مِن المعروف أنَّ كلَّ ما له بدايةٌ لا بدَّ أن تكونَ له نهاية.

(٥) ويُشيرُ قولُه تعالىٰ «بأييد» إلىٰ القوّةِ العظيمةِ التي أوجدَ الخالقُ بها عالَمَنا، **وهل يعلمُ القوّةَ التي خُلِقَ بها العالَمُ إلاَّ خالِقُها نفسُه؟**

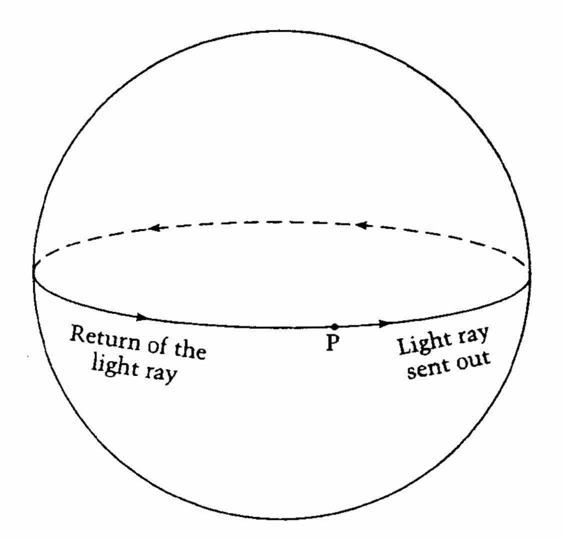
(٦) وقولُه تعالىٰ «وإنّا»، قد جاء فيه أمرانِ، فهو جاء بصيغةِ **التوكيدِ** وصيغة الجمع للمتكلّم ـ إنّه لا مُوجِدَ مِن العَدَمِ، أي لا خالِقَ، إلاَّ اللَّهُ تعالىٰ، جَلّتْ قدرتُه.

(٧) وقولُ الحقِّ سبحانَهُ وتعالىٰ «لموسعونَ» قد دَلَّ علىٰ **التوسُّعِ المستمرِّ**، في الماضي كما في الحاضرِ والمستقبل، وإلىٰ أن يشاءَ اللَّه، فالكونُ في كتابِ اللَّهِ هو واسعٌ ومتوسِّعٌ.

(٨) جاءتِ الآيةُ الكريمةُ بكلِّ هذه المعجزات، وهي معجزةٌ قد دلّت علىٰ **صِدْقِ رسالةِ رسولِ اللَّه** (ﷺ) الذي جاء بتلك الحقائقِ المعجزة مِمّا لم يُعرَف إلاَّ في القرنِ العشرين، مثلما هي **آيةٌ علىٰ خَلْقِ الخالِقِ تباركَ وتعالىٰ**، وأنَّ مُنزِلَها هو الخالقُ سبحانَه لا أحَدَ غيرُه.

د.س

[1] انظر كتاب «أسرار الكون في القرآن»، للمترجم، دار الحرف العربي، بيروت، ط٢ (١٩٩٩)، ص ١٤٠.



الشكل ٧,٢٨: تخيَّلْ عالماً مِن بُعديْنِ اثنينِ محدوداً بسطحِ كرة. إنّ لهذا السطحِ مساحةً محدودةً ولكن مِن دونِ حدود a finit area but no boundary. إنَّ مخلوقاً مسطّحاً يمكنُه أن ينزلقَ علىٰ طولِه مِن دونِ نهايةٍ ومِن دونِ مواجهةِ حافةٍ أو حدٍّ edge or boundary. إنَّ أشعةَ للضوءِ مُرسَلَةً مِن النقطةِ P إلىٰ اليمين سترسمُ دائرةً كبيرةً، ثم هي تعودُ إلىٰ النقطةِ P، من الجهةِ اليسرىٰ. إنَّ عالَمَ آينشتاينَ هو طبعةٌ لهذه الصورةِ ذاتُ ثلاثةِ أبعاد.

وماذا كان يوجدُ هناك **قبلَ** الانفجارِ الكبيرِ؟ لا شيء[1]! حتىٰ ولا مكان ولا زمان. وفي الحقيقةِ فلقد بَلَغَتْ حالةُ الكونِ، في تلكَ الحِقبةِ، حدّاً مِن الغرابةِ جعلَها ممتنعةً علىٰ الوصفِ الفيزياويّ. وقد يمكنُ للمرءِ أن يبدأ تكتكةَ الساعةِ الكونيةِ بَعْدَ أن جاءَ هذا الحَدَثُ الابتدائيُّ primordial event بالكونِ إلىٰ الوجودِ، مباشرةً. وهو شيءٌ يشبهُ، في واقعِ الحالِ، حالةَ «الفَرْدانية» singular state باعتبارِها نقطةَ النهايةِ لجسمٍ في حالةِ انكماشٍ جاذبيّ gravitational collapse (انظرْ الفصلَ الخامس). وكما ذكرْنا هناك، فإنَّ الفرقَ هو في أنَّ العالَمَ **يتوسّعُ exploding** مِن تلك الحالةِ، وليس **ينفجر نحو الداخل imploding**.

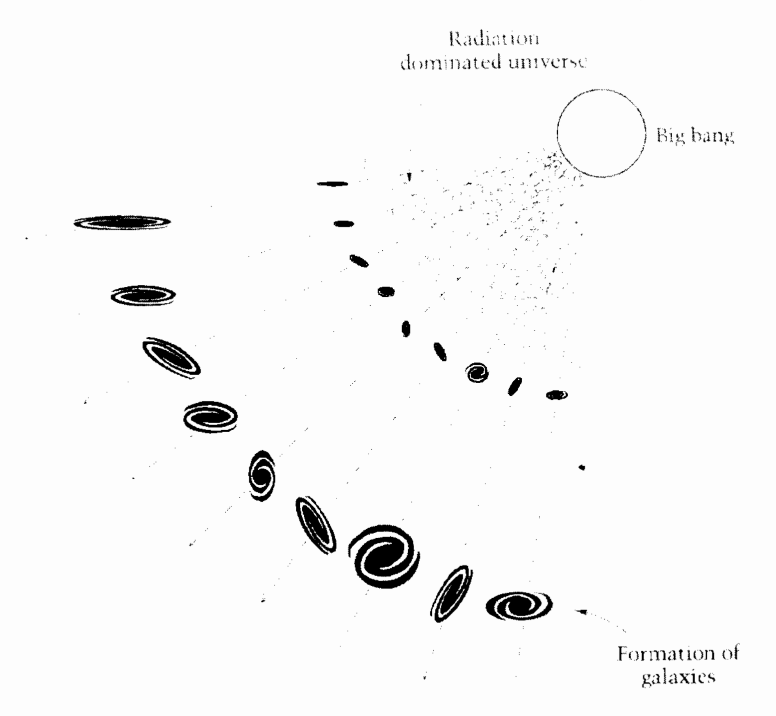
ويمكنُ لنا أن نقيسَ «عُمرَ العالَم» علىٰ هذه الساعةِ الكونيةِ، باعتباره الزمنَ المُنقضيَ منذُ الانفجارِ الكبير. إنَّ هذه القيمةَ هي غيرُ أكيدةٍ، حتىٰ أننا لا نعرفُ قيمةَ ثابتِ هابل الحقيقية. ولنموذجٍ كونيٍّ مِن النوعِ الأولِ، فإنَّ عمرَهُ بحدودِ ٨ ـ ١٠ بلايين عام. وبالنسبةِ إلى نماذجِ النوعِ الثاني فهو أقلّ، وأمّا بالنسبة إلى نموذجِ النوعِ الثالثِ فهو أعلىٰ نوعاً ما.

---

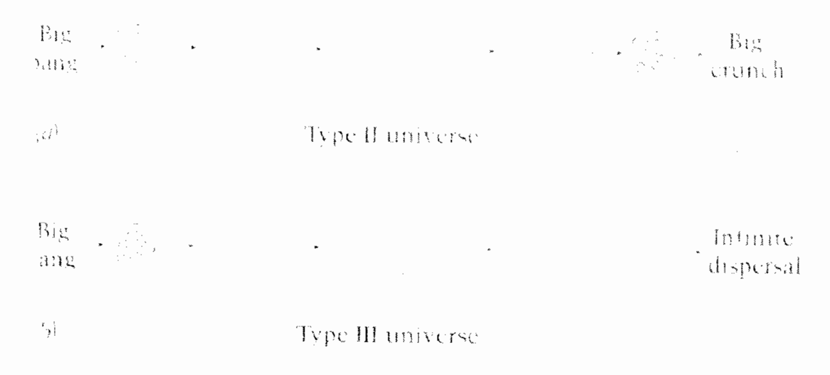
(١) لا يستبعدُ العلماءُ (وأيُّ طالبِ علم حَقّ يمكنهُ أن يستبعد؟)، بل هم يعتقدون، الآنَ، بوجودِ عوالِمَ عديدةٍ غيرِ عالَمِنا الذي نعرفُه. وإنَّه قد اسْتبانَ للعلماءِ، مِن دونِ شكٍّ، أنه كلما تكشَّفَتْ لهم صفحةٌ أو صفحاتٌ مِن المجهولِ الذي يلُفُّ الكونَ والخَلْقَ طرّاً، كلَّما رأىٰ العلماءُ أنفسَهم في مجاهيلَ لا قِبَلَ لهم بها، حتىٰ صارَ طريقةً علميةً حديثةً شاعَ أمرُها أن يفترضَ العلماءُ الأمورَ افتراضاً محضاً فيما عساهُ أن يكون هناك مِن كونٍ أو أكوانٍ، ثمَّ هم يتلمّسونَ، في متاهاتهم، ما قد يرجِّحُ أو يستبعدُ ما وضعوهُ مِن الافتراضاتِ الغريبة المفترَضَةِ مَحْضَ افتراضٍ ليس إلاّ. د. س

هل إنَّ العالَمَ مفتوحٌ open أمْ مُغْلَق closed؟

إنَّ النماذجَ التي وصفناها يجمعُ بينها أنها تشتركُ في تاريخ واحد، ولكنها لا تشتركُ في المستقبَلِ الواحد. وعلىٰ الأخصِّ، فإنَّ كلَّ نماذجِ النوعِ الثالثِ تصفُ عالَماً يستمرُ في التوسّعِ إلىٰ الأبد. وفي كونٍ كهذا، فإنَّ مجرّتَنا ستُتْرَكُ مِن دونِ جيران، حيثُ إنها تتشتّتُ إلىٰ أبعادٍ لانهائية. ويا لها مِن حالةٍ للوحشة! ولكنَّ ذلك قد يكون أفضلَ مِمّا يمكنُ أن يحدثَ لنا لو كنّا جزءاً مِن عالَم مِن النوعِ الثاني. إنَّ عالَماً كهذا سوف يستمرُّ في التوسعِ لفترةٍ مِن الزمن، ثم هو يتباطأُ، في نهاية المطاف، ليصلَ إلىٰ حالةٍ مِن التوقّفِ المؤقّت، ثم يبتدِئُ في الانكماش. ولوسف يستمرُّ في تقلّصِه، ويصيرُ أصغرَ وأصغرَ، حتىٰ يبلغَ حالةً مِن الكثافةِ ودرجةِ الحرارةِ اللانهائيتيْن infinit density and temperature. وتُعرَفُ هذهِ الحالةُ، وهي علىٰ العكسِ مِن الانفجارِ الكبير بالضبط بـ «**الانسحاقِ الكبير**» **big crunch**، إذ سوف يُسحَقُ كلُّ شيءٍ في الكونِ في حالةٍ مِن الكثافةِ اللانهائية. ويُظهِرُ الشكلُ ٧,٢٩ تصوّراً لفنانٍ عن الانفجارِ الكبير، بينما يوضِّحُ الشكلُ ٧,٣٠ حالتيِّ المستقبَلِ الممكنتيْنِ هاتيْن.



الشكل ٧,٢٩: تصوُّرٌ لفنّانٍ عن الانفجارِ الكبير. إنَّ الوصفَ التقنيَّ لهذه الحالةِ لَهُوَ أمرٌ بالغُ الغرابة.



الشكل ٧,٣٠: نرىٰ في (a) الحالةَ المستقبليةَ النهائيةَ لكونٍ مِن النوعِ الثاني، وفيه تنسحقُ المجرّاتُ كلُّها معاً، عندما ينكمشُ الكونُ سِراعاً إلىٰ حالَةٍ مِن الكثافةِ اللانهائية. أمّا في (b) فنرىٰ أنموذجاً لمستقبَلِ كونٍ مِن النوعِ الثالث، حيثُ تتخلّفُ مجرّةٌ أنموذجيةٌ مِن دونِ جيران، وحيثُ قد تبدّدت المجرّةُ كلُّها إلىٰ مسافاتٍ لا نهائية.

وماذا عن أنموذجِ النوعِ الأولِ مِن العالَم؟ إنه نوعٌ متفرِّدٌ بذاتِه، وهو يقِفُ علىٰ الحدِّ الفاصلِ ما بين نموذجَيِّ النوعِ الثاني والثالث. وهكذا فإنه يتوسّعُ أيضاً، وإلىٰ الأبد، مِثلَ نماذجِ النوعِ الثالث، ولكنْ بالكاد، إذ إنَّ نُقصاناً صغيراً في سرعةِ توسّعِه وحسْب يؤدي به في النهايةِ إلىٰ الانكماشِ، وكما هو عليه الحالُ في أنموذجِ النوعِ الثاني. ويُعرَفُ أنموذجُ النوعِ الأولِ، أيضاً، باسمِ أنموذجِ آينشتاين ـ ديسيتر Einstein - de Sitter model، لأنَّ كلاًّ مِن آينشتاين وديسيتر أيّدا هذه الفكرةَ، في ورقةٍ بحثٍ مشتركةٍ، عامَ ١٩٣٢.

وكما ذكرْنا مِن قبلُ (انظرْ الفصلَ الخامس)، فإنَّ نظريةَ الجاذبيةِ لآينشتاين تَنْسُبُ هندسةَ الزَّمْكانِ geometry of spacetime بِحَسَبِ حالةِ محتوياته. وهكذا فإنَّ مستقبَلَ أنموذجٍ ما يعتمدُ علىٰ هندسته. **إنَّ النماذجَ المغلقةَ المتوسعةَ كلّها يتوجبُ أن تنكمشَ في النهايةَ حتىٰ تبلغَ الانسحاقَ الكبير. وبالمِثل، فإنَّ النماذجَ المفتوحةَ كلَّها يتوجّبُ أن تتشتَّتَ مجرّاتُها إلىٰ اللانهاية All closed expanding models would eventually contract to hit the big crunch. Likewise, all open models would disperse their galaxies to infinity.**

وبالنسبةِ إلى النماذجِ الأبسط، والتي نناقشُها الآنَ، توجدُ وسيلةٌ بارعةٌ نوعاً ما،

للتمييزِ بين الأنواعِ المفتوحةِ والمغلقة. وحكمُ التجربةِ هذا هو كالآتي: **نقومُ بقياسِ كثافةِ المادةِ في العالَم. فإذا ما تَعَدّتْ قيمةً حرجةً معيَّنةً، فإنَّ الكونَ مغلَقٌ إذاً. وأما إذا لم يكنْ كذلك فهو مفتوح.**

وما هي القيمةُ الحرجة critical value؟ إنّ معادلاتِ آينشتاينَ تنبئُنا بأنّها الكثافةُ التي يتوقعُها المرءُ في كونٍ مِن النوعِ الأول. ويمكنُ للعلماءِ أن يقرروا إن كانوا عارفين بالقيمةِ الصحيحةِ لثابتِ هابل. ولمّا كنا قد وجدْنا توّاً بأنّ قيمةَ ثابتِ هابلِ الحقيقيةَ ليس مِن السهلِ تثبيتُها، وأنّ قياسَها لا يزالَ مشوّشاً بالأخذِ والردِّ بين العلماء، فإننا لا نعلمُ قيمةَ الكثافةِ الحرجةِ هذه تماماً. ولسوف نستخدمُ مرّةً أخرىٰ قيمةً تقريبيةً كمؤشّرٍ وحَسْب، إنها جزءٌ يسيرٌ مِن كثافةِ الماء، جزءٌ هو مِن الصِّغَرِ بحيثُ إنه يبلغُ عشرةَ أجزاءٍ مِن مليونِ مليونِ مليونِ مليونِ مليونِ جزء. ولسوف نشيرُ إليه علىٰ أنه **الكثافةُ الحرجةُ critical density، أو كثافةُ الإغلاق closure density**. وتخبرُنا التسميةُ بحقيقةٍ مفادها أنه مِن أجلِ «إغلاقِ العالَم» to close the universe، فلا بدَّ أن تتعدىٰ كثافةُ المادةِ هذا المقدار.

وعلىٰ أيةِ حالٍ فإنَّ كثافةَ الكونِ[1] ليست مِمّا يمكنُ تحديدُه بسهولة. ثم إنَّ هناك مضاعَفاتٍ تمنعُنا مِن الحصولِ علىٰ جوابٍ مباشرٍ وواضحِ المعالِم، وهو ما سنناقشُه بعدَ قليل. وفي واقعِ الحال، فلقد أكّدَتْ هذه المضاعَفاتُ، مرَّةً أخرىٰ، علىٰ المَثَلِ الذي يقولُ «**إنَّ الرؤيةَ ليست هي التصديق» seeing is not believing**.

وهناكَ طريقةٌ غيرُ مباشرةٍ، لاختبارِ إنْ كان العالَمُ مفتوحاً أو مُغلَقاً، وهي تستخدمُ تأثيرَ المادةِ في الضوء. ولقد اقترحَ هذا الفحصَ فريد هُويْل، في عامِ ١٩٨٥، وهو ما يفتحُ البابَ أمامَ مستقبلٍ بارزٍ للهندسةِ غيرِ الإقليدية.

هل يمكنُ أن تبدو الأجسامُ البعيدةُ أكبر؟

فلنُنْعِمِ النظرَ، أولاً، في ملاحظةٍ اعتياديةٍ قد خبرناها في كلِّ يوم. إننا إذا ما تطلّعْنا مسافاتٍ أبعَدَ وأبعد، لرأينا أجساماً تصيرُ أصغرَ وأصغرَ في رأيِ العيْن. وقد تُقَزِّمُ بنايةٌ قريبةٌ منّا وتتألفُ مِن طابقيْنِ ناطحةَ سحابٍ تتألفُ مِن عشرينَ طابقاً وتبعُدُ عنّا صَفَّيْنِ مِن البنايات. وقد يظُنُّ متسلِّقُ الجبالِ أنَّ القممَ البعيدةَ لا تبدو سامقةً جدّاً، ليكتشفَ باقترابه منها أنها سامقةٌ جدّاً فعلاً.

---

(١) إنه ذلك الكونُ الذي وَصَلَتْ إلىٰ حدودِه فوَقَفَتْ مَراقبُ العلماءِ، ليس إلاّ، وأما غيرُه من الأكوانِ، أو العَوالِمِ، فعلمُ ذلك عند اللّه سبحانَه وتعالى. د.س

وهناكَ تفسيرٌ بسيطٌ لهذا التأثير. إنّ الإحساسَ بحجمِ الجسمِ ينبني على الزاويةِ المقابلةِ للجسم في العين (انظر الشكل ٧,٣١). وكلما بَعُدَ الجسمُ، كلّما صَغُرَت هذه الزاوية، وبصورةٍ عكسيةٍ مع المسافة. افرضْ، مثلاً، أننا نشاهدُ شجرةً مِن علىٰ مسافةِ خمسينَ مِتراً ثم مِن علىٰ بُعْدِ خمسمائةِ متر، فلسوف يبدو حجمُها أصغرَ بعَشْرِ مرّاتٍ في الحالةِ الثانيةِ مقارنةً مع الأولىٰ.

ولكنّ هذه النتيجةَ تعتمدُ علىٰ هندسةِ إقليدس. وقد لا ينطبقُ الأمرُ ذاته مثلاً علىٰ كونٍ متوسع، حيث تكونُ هندسةُ الزَّمْكانِ هندسةً لا إقليدية[1]، وهو أمرٌ قد أشارَ إليه هويْل. إنَّ مسارَ أشعّةِ الضوءِ عَبْرَ المكان يعتمدُ، كما قد رأيْنا، علىٰ الهندسةِ الزَّمْكانية spacetime geometry. ولقد رأيْنا أيضاً كيف يمكنُ أن يُحنىٰ مَسارُ الضوءِ مِن قِبَلِ المادةِ الموجودةِ في المسار، وهي يمكنُ أن تؤدّيَ إلىٰ عَدْسٍ جاذبيّ gravitational lensing. وهكذا فإننا نتوقّعُ ابتعاداً عن السلوكِ الإقليديِّ الموصوفِ أعلاهُ، فعلاً، وكلَّما زادت كميةُ المادةِ في الكونِ، كلَّما ازدادَ هذا الابتعاد.

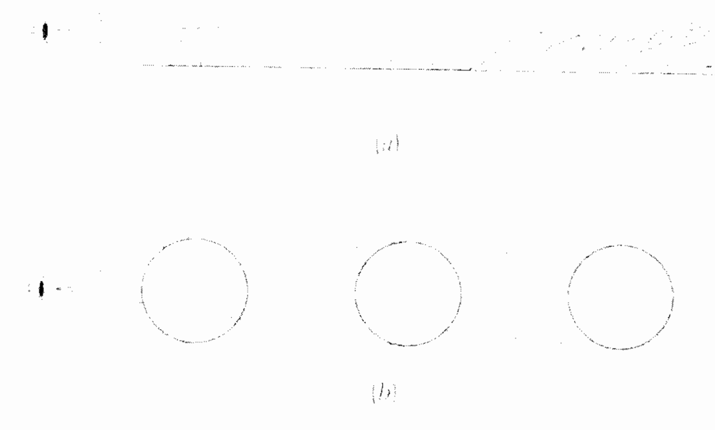
فلننظرْ إلىٰ النتيجةِ التي استخرَجَها هويْل لنموذجِ العالَم المتوسّع. وبُغْيَةَ إظهارِ الفروقِ، فإنَّ الشكلَ ٧,٣٢ يُقابلُ بين سلوكِ مجموعةٍ مِن مصادرَ ضوئيةٍ متماثلةٍ تقعُ علىٰ أبعادٍ مختلفةٍ، فنرىٰ في (a) عالَماً إقليدياً، وفي (b) عالَماً متوسّعاً غيرَ إقليديّ.

ويقلُّ الحجمُ الظاهريُّ، في العالَم الإقليديِّ، باستمرارٍ، كلّما زادَ ابتعادُ المصادر. وفي الهندسةِ اللاإقليديةِ للعالَم المتوسّعِ فإنَّ النتيجةَ غيرُ متوقَّعَةٍ إلىٰ حدٍّ ما، لأنَّ الزاويةَ التي تُقابلُ المصدرَ تصغُرُ في أوّلِ الأمر، ثم هي **تبدأ بالازدياد بازديادِ المسافة**.

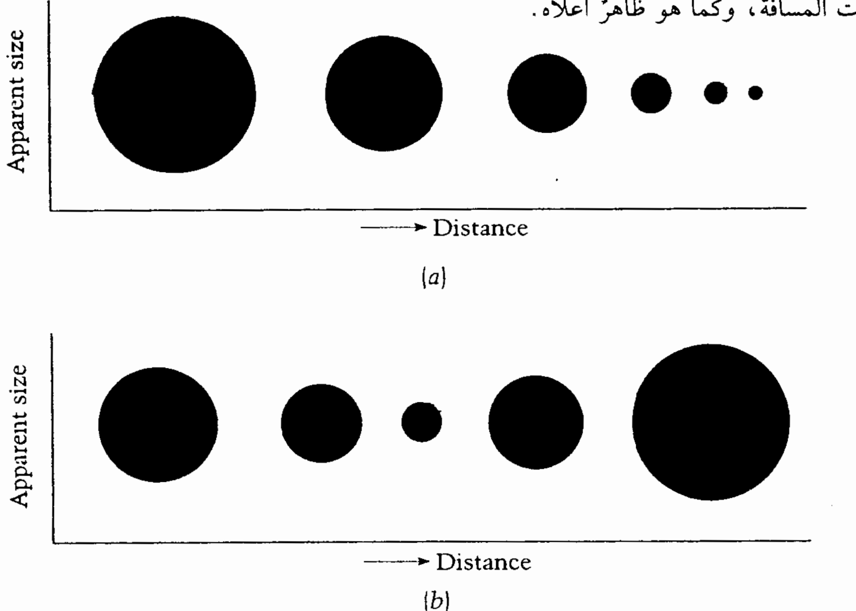
وذلك يعني، وكما يظهرُ لنا في الشكل ٧,٣٢ (b)، أنّ المصادرَ تبتدئُ رِحلتَها بأنْ تبدوَ أصغرَ وأصغر، كلَّما زادَ بُعدُها عنّا، ولكنها تبدأُ بالظهورِ أكبرَ، بعد مسافةٍ معيَّنة! وهكذا يبدو المصدرُ أكبرَ حجماً كُلَّما ابتعدَ عنّا. وقد يعني هذا النقصانُ الذي تتبَعُهُ الزيادةُ أنَّ الزاويةَ المقابلةَ للمصدرِ تَصِلُ أدناها مِن علىٰ مسافةٍ معيّنة. وفي **النقطةِ الدنيا minimum point** هذه فإنَّ المصدرَ سيبدو أصغرَ ما يكونُ حجماً.

وعندما قامَ هويْل بفحصِ نماذجِ الكونِ المتوسع المختلفةِ لاحظَ بأنَّ بُعْدَ النقطةِ الدنيا يقِلُّ كلَّما زادت كثافةُ المادةِ الكونية. وإذا أخذْنا الإزاحةَ الحمراءَ باعتبارِها مقياساً للبُعد، فإنَّ النقطةَ الدنيا في أنموذجِ آينشتاين ـ ديسيتر تقعُ علىٰ إزاحةٍ للأحمرِ تبلغ

(١) انظرْ الفصلَ الخامس لمناقشةٍ عامّة للهندسةِ اللاإقليدية.



الشكل ٧,٣١: نرىٰ في (a) أنّ الشجرةَ القريبةَ يمكنُ أن تُقابلَ زاويةً أكبرَ في عينِ الراصدِ، مِن حبلٍ هو أعلىٰ منها بكثيرٍ ولكن أبعدَ منها. ونرىٰ في (b) التفسيرَ الهندسيَّ لكونِ زاويةِ الجسمِ البعيدِ صغيرةً، وإذا وُضِعَتْ أجسامٌ ذاتُ حجمٍ واحدٍ علىٰ أبعادٍ مختلفةٍ، فإنَّ الزاوية المقابلةَ تقِلُّ كلما زادت المسافةُ، وكما هو ظاهرٌ أعلاه.



الشكل ٧,٣٢: نرىٰ في (a)، في كونٍ إقليديّ، سلسلةً مِن مصادرَ ضوئيةٍ مستديرةٍ ومتماثلةٍ علىٰ أبعادٍ مختلفةٍ عن الراصد. وكلّما ازدادت أبعادُها كلّما بَدَتْ أصغرَ وأصغر. وعلىٰ العكسِ مِن ذلك، فإننا نجدُ في (b) أنَّ مجموعةً متشابهةً مِن المصادرِ في كونٍ متوسّعٍ قد تُبدي سلوكاً غيرَ طبيعي. إننا نرىٰ أنَّ المصادرَ تصبحُ أصغرَ وأصغر كلّما نظرْنا إلىٰ المصادرِ الأبعدِ والأبعد، في بدايةِ الأمر، ولكن، وبعدَ مسافةٍ معيّنةٍ، فإنَّ المصادرَ الأبعدَ تبدو وقد صارت أكبر! إنَّ النُقطةَ التي يبدو فيها المصدرُ أصغرَ ما يكونُ حجماً يُمكنُ أن نسمّيها النقطةَ الدُنيا.

١,٢٥، بينما تقعُ النقطةُ الدنيا في نماذجِ النوعِ الثاني في إزاحاتٍ حمراءَ أصغر. أمّا بالنسبة إلىٰ نماذجِ النوعِ الثالثِ فإنَّ النقطةَ الدنيا تقعُ بأبعدَ مِن ذلك، في إزاحاتٍ حمراءَ أكبرَ مِن ١,٢٥.

إنَّ هذا التكبيرَ الظاهريَّ للأجسامِ البعيدةِ هو، وبكلِّ بساطةٍ، مثالٌ آخَرُ علىٰ العَدَسِ الجاذبيّ، وهو ما تطرَّقْنا إليه في الفصلِ السابق. إنَّ أشعةَ الضوء القادمةَ مِن مصدرٍ بعيدٍ يتمُّ حنيُها بفِعْلِ المادّةِ الفضائيةِ التي تقعُ في طريقها، وبطريقةٍ نرىٰ فيها صوراً متوسِّعةً للمصادرِ البعيدة.

ورغمَ أنَّ اختبارَ التكبيرِ هذا يتوجّبُ أن ينبئَنا، مِن حيثُ المبدإِ، عن نوعِ العالَم الذي نعيشُ فيه، فإنه يتبيّنُ لنا، في واقعِ الحال، أنه ليس محدّداً بوضوح. ويعودُ السببُ في ذلك إلىٰ أنّ الطبيعةَ لا تسمحُ للفلكيِّ بتَرَفِ أن تكونَ لديه طائفةٌ مِن مصادرَ متماثلةِ الحجم. وسواء أكانت مجرّاتٍ أم مصادرَ راديويةٍ، أم كوازاراتٍ، فإنَّ أعضاءَ أيةِ مجموعةٍ ما تُبدي تغايراً عظيماً في حجمِها الفعليّ. وهذا يجعلُ مِن المستحيلِ تقريباً اكتشافُ المنحىٰ المتوَقَّعِ أعلاهُ وتعيينُ موقعِ النقطةِ الدنيا.

وعلىٰ الرغمِ مِن ذلكَ، فإنَّ لهذا الاختبارِ أهميةً كامنةً بالغةً، وهو يُغري الفلكيينَ، باستمرارٍ، بالبحثِ عن جمهرةٍ متجانسةٍ مِن المصادرِ، مِمّا يمكنُ إن يُطَبَّقَ عليها هذا الاختبارُ، بنجاحٍ، في نهايةِ المطاف.

آثارُ الانفجار الكبير

إنّ فكرةَ الكونِ الواسِعِ والممتدِّ علىٰ مقياسٍ لا يقلُّ عن عشراتِ البلايينِ مِن السنينِ الضوئية، والمتوسّعِ، لهيَ أمرٌ غيرُ اعتياديٍّ بالمرّة، وإنه لَمِمّا يتطلّبُ خيالاً عظيماً أن يعنيَ ذلك أنَّ هذا البنيانَ كلَّهُ قد نشأَ عن انفجارٍ هائل. ولكنْ، وفي مقاربةٍ علميةٍ للمشكلةِ، لا بدَّ مِن أن ننظرَ بنظرةٍ غيرِ انفعاليةٍ إلىٰ البرهانِ الذي يؤيّدُ هذه الصورة.

ولقد قامَ الفيزياويُّ الأمريكيُّ جورج غامو، في أواسطِ أربعينات القرنِ العشرين، بخطوةٍ في هذا الاتجاه. قامَ غامو بالتقدير الاستقرائيِّ[١] لنماذجِ العالَمِ المتوسّع في الماضي، وتوصَّل إلىٰ سيناريوهات بالغةِ الدَّلالَة.

---

(١) **الاستقراء induction**: الوصولُ مِن الخاصِّ إلىٰ العامّ، أو مِن التفاصيلِ إلىٰ الإجمال، أي تتبُّعُ الجزئياتِ للوصولِ إلىٰ حكمٍ كليّ. مثلاً: الأرضُ كروية، وإذاً بقيةُ الأجرامِ كرويةٌ أيضاً.

أولاً، عندما قامَ بفحصِ الأدلةِ المتوفرة حينئذٍ حولَ حالةِ العالَم، فقد وجدَ أنه يحتوي، في الحِقبة الحاضرةِ، على المادةِ غالباً، وعلى القليلِ القليلَ مِن الإشعاع. ولكنْ، ومِن خلالِ التقديراتِ الاستقرائيةِ الحسابيةِ المبنيةِ على الماضي، تنخفضُ الأهميةُ النسبيةُ للمادةِ مقارنةً مع الإشعاع. وكما نعلمُ، فإنَّ كرةَ الغازِ إذا ما ضُغِطَتْ، فإنها تصيرُ أكثرَ كثافة. ويحدثُ الشيءُ ذاتُه لكرةٍ تحتوي على الإشعاع، إذ إنَّ كثافةَ الإشعاع داخلَ الكرةِ سوف تزيدُ أيضاً. ولكنّ كثافةَ الإشعاع تزيدُ بأسرعَ مِن زيادةِ كثافةِ المادة. وتدلُّ الحساباتُ على أنَّ كثافةَ الإشعاعِ، عندما كان العالَمُ أصغرَ بِعَشْرِ مرّاتٍ عمّا هو عليه الآن، كانت أكبرَ **بعشرة آلافِ مرّةٍ** عمّا هي عليه اليوم. ولسوف يستمرُّ هذا المنحى إذا ما سِرْنا في الماضي أبعدَ وأبعد. ولذا فقد قالَ غامو إننا إذا ما سِرنا بعيداً في الماضي السحيق، وعندما كان العالَمُ بالغَ الكثافة، فلسوف نجدُ بأنَّ الإشعاعَ كان يَغلِبُ فيه على المادة. ومِن ثَمَّ فلقد كانت درجةُ حرارتِه أعلى بكثيرٍ عمّا هي عليه اليوم.

وتضمّنَ استنتاجُ[١] غامو التالي النظرَ في كيفيةِ توسُّع عالَم يَغلِبُ عليه الإشعاعُ، وكيف سوف تقِلُّ درجةُ حرارتِه، بمرورِ الوقتِ، في تلك الحِقَبِ الزمنيةِ المبكّرة. ولقد أثارَ اهتمامَه بالخصوصِ ذلك العهدُ الذي كان فيه العالَمُ يمرُّ عَبْرَ مدىً زمنيٍّ يتراوحُ بين الثانيةِ الواحدةِ وحوالى الثلاثِ دقائق، ذلكَ لأنّ درجةَ حرارة العالَم قد انخفضت، في ذلك العهد، بعاملٍ يقرُبُ من مائةٍ، مِن حوالى عشرِ بلايين درجةٍ إلى حوالى مئاتٍ قليلةٍ مِن ملايينِ الدرجاتِ الحرارية. وقالَ غامو إنه، في درجاتِ الحرارةِ تلك فإنَّ الجسيماتِ تحتَ النووية subnuclear particles، وهي النيوتروناتُ والبروتونات، يمكنُ أن تتّحِدَ لتكوينِ نوى كلِّ العناصرِ الكيمياوية التي نراها في العالَم.

ونحن نتذكّرُ بأننا واجهنا، في الفصلَيْنِ الثاني والثالث، درجاتِ حرارةٍ مُشابهةٍ في لُبِّ النجوم، ورأيْنا كيف أنّ النجومَ تلعبُ، في درجاتِ الحرارةِ تلك، دَوْرَ المُفاعِلاتِ النوويةِ الاندماجيةِ الحرارية thermonuclear fusion reactors، مُولِّدةً الطاقةَ **عند تكوينها للنَوى الذرية**. لقد رجا غامو أن يكون مِن الممكنِ حدوثُ تطوّراتٍ مشابهةٍ في أوّلِ نشوءِ الكون.

واستمرّ غامو، مع رفيقيهِ الأصغرِ منه رالف آلفر وروبرت هرمان (الشكل ٧,٣٣ «أ»

---

(١) **الاستنباط = الاستنتاج = الاستدلال = القياس deduction**: الخروجُ مِن القاعدةِ العامّة إلى التفاصيل. مثلاً: كلُّ ما في الكونِ كرويٌّ، إذاً: الأرضُ كرويّة. د.س

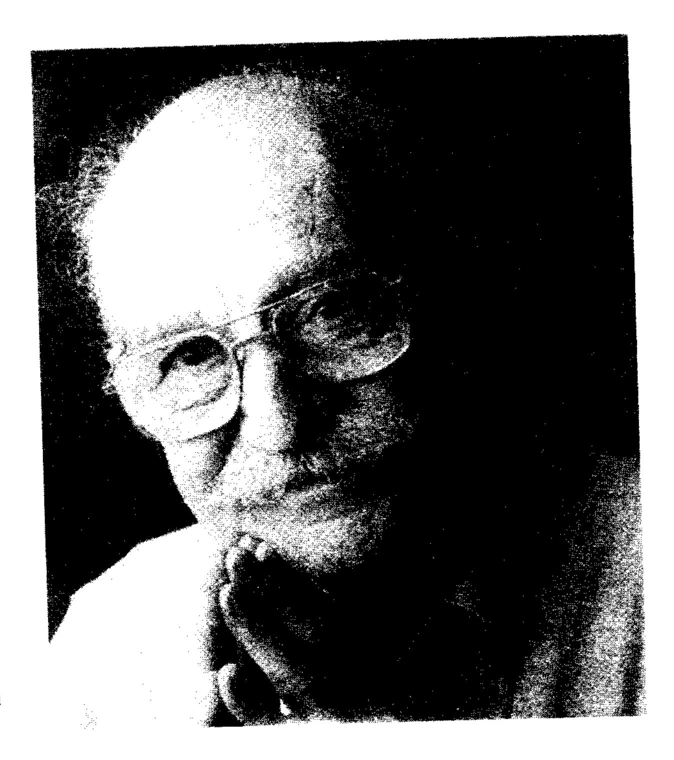
و«ب» و«ج»)، في القيامِ بمهمّتِه الطموحة لمعرفةِ كيف تتسبّبُ هذه التفاعلاتُ الاندماجيةُ في توسيعِ العالَم سريعاً. وإذا ما قُمنا باستعادةِ الأحداثِ الماضيةِ والتأمُّلِ فيها، مع المعلوماتِ التي أضيفت حول النَّوىٰ الذريةِ، فإنَّ بإمكاننا أن نقول إنّ غامو قد حصلَ علىٰ نجاحٍ جزئيٍّ في برنامجه ذاك. نحن نعلمُ الآنَ بأنَّ الكونَ المبكّرَ كان في وسعِه أن يصنعَ نوىً خفيفةً كالديوتيريوم deuterium، والتريتيوم tritium، والهيليوم helium، ولكنه لم يكُنْ في وسعِه أن يصنعَ النوىٰ الأثقل، ابتداءً مِن الكاربون وما يليه. إنَّ عمليةَ صنعِ النواةِ الأوليةِ تتوقّفُ تقريباً عند نواةِ الهيليوم، تلك النواةِ المستقرّةِ ذاتِ النيوترونيْنِ والبروتونيْن. أمّا بَعْدَ ذلك فإنّ العمليةَ تُواجِهُ نَوَىً غيرَ مستقرّة. والسببُ في ذلك هو كالذي ذكرْناهُ في حالةِ نجومٍ كالشمس، حيثُ توجدُ مشكلةُ عبورِ حاجزٍ يتكوّنُ مِن نوىً غيرِ مستقرّة تحتوي علىٰ عددٍ مِن الجسيماتِ يتراوحُ بين الخمسةِ والثمانية. ولقد رأيْنا كيف حُلَّت المُعضِلةُ، بالنسبة إلى النجومِ، بوساطةِ حلٍّ فريد هويْل للتفاعلِ الرّنان،



الشكل ٧,٣٣ «أ»: جورج غامو.



الشكل ٧,٣٣ «ب»: رالف آلفر.



الشكل ٧,٣٣ «ج»: روبرت هرمان.

والذي يصنعُ نواةً للكاربون مِن ثلاثِ نَوَىً للهيليوم. إلاّ أنَّ هذا العملَ البارعَ لا يجري في العالَمِ المبكِّر. وهكذا فلقد صارَ مِن الضروريِّ أن نرنوَ إلىٰ النجومِ لصُنعِ النوىٰ مِن الكاربون وما فوقَه.

خلفيةُ الأشعّةِ الدقيقة The microwave background

وعلىٰ الرغم مِن ذلك، فلقد قامَ غامو وآلفر وهرمان بتنبؤٍ هامّ. لقد تنبأوا بأنْ سوف تكون هناك خلفيَّةٌ لآثارٍ إشعاعيةٍ في أعقابِ عمليةِ صُنع النواةِ الأولية، والتي لا بدَّ أنها بَرَدَتِ اليومَ إلىٰ درجاتِ حرارةٍ منخفضةٍ جداً. وإذْ لم يكنْ لدىٰ آلفر وهرمان أيّةُ طريقةٍ دقيقةٍ لحسابِ درجةِ الحرارةِ هذه، فلقد قَدَّراها بنحوٍ مِن خمسِ درجاتٍ علىٰ المقياسِ المطلَق (5K)، أي ما يعادلُ ٢٦٨ درجةً مئويةً تحت الصفر، بينما افترضَ غامو بأنها أعلىٰ مِن (7K). ويتَّصِفُ هذا الإشعاعُ، وكما توقّعَهُ، بأنه لا بدّ أن يكون له طيفُ جسمٍ معتم (انظُرْ الفصلَ الثاني لوصف الأخير).

ولقد تُنوسِيَ هذا التنبؤُ، بدرجةٍ أو بأخرىٰ، خلالَ خمسيناتِ القرنِ العشرين، عندما عُرِفَ بأنَّ صنعَ النواةِ الأوليةِ سوف لن يُنتجَ العناصرَ الكيمياويةَ التي نراها في الكونِ كلِّها، وأن أغلبها لا بُدَّ أنه قد صُنِعَ في النجوم. وهكذا فعندما كشفَ آرنو بنزياس وروبرت ويلسون، عامَ ١٩٦٤، عن خلفيةِ الإشعاعِ مُوَحَّدِ الخواصّ، مِن دونِ أيِّ مصدرٍ معروفٍ له، وبطولٍ موجيٍّ مِن ٧,٣ السنتيمتر، فلقد تحيّرا في فهمِ المصدرِ الذي جاء منه هذا الإشعاع. وعند عملِهما في مختبراتِ تلفون بيل، في هومديل بنيوجيرسي، فلقد كانا يختبرانِ، في واقعِ الحال، هوائياً مصنوعاً علىٰ شكلِ قَرْن (انظرْ الشكل ٧,٣٤)، لقياسِ الشِّدَّةِ الراديوية في مستوىٰ مجرّةِ دربِ التبّانة. وبَعْدَ أن حذفا كلَّ ما يمكنُ أن يشاركَ في الإشعاع الذي لاحظاهُ، فلقد بقيَ ذلك الجزءُ الصغيرُ، ولكنْ غيرُ الصفريّ. ولمعرفةِ إن كان مصدرُ الإشعاعِ ناتجاً عن تلوّثٍ ما، فقد قامَ بنزياسُ وويلسون بما هو أكثرُ مِن ذلك، إذ قاما بفحصِ الهوائيِّ لاستبعادِ وجودِ فَضَلاتٍ للطيورِ عليه!

وانتقلتْ أخبارُ هذا الكشفِ إلىٰ برنستون، حيثُ كان بوب ديك وجيم بيبلز يقومانِ بدراساتٍ عن بقايا الإشعاع، ولكنهما توصّلا إلىٰ استنتاجاتهما بمعزِلٍ عن أبحاثِ غامو وآلفر وهرمان السابقة. ولقد كان بإمكانِهما أن يتعرّفا علىٰ بقايا الإشعاع في مكتشَفاتِ بنزياس وويلسون. وهكذا تَسبَّبَ بحثُهما المعنونُ «قياسٌ لدرجةِ حرارةٍ زائدةٍ لهوائيٍّ في 4080M c/s»، والذي نُشِرَ في **المجلة الفيزياوية الفلكية Astrophysical**

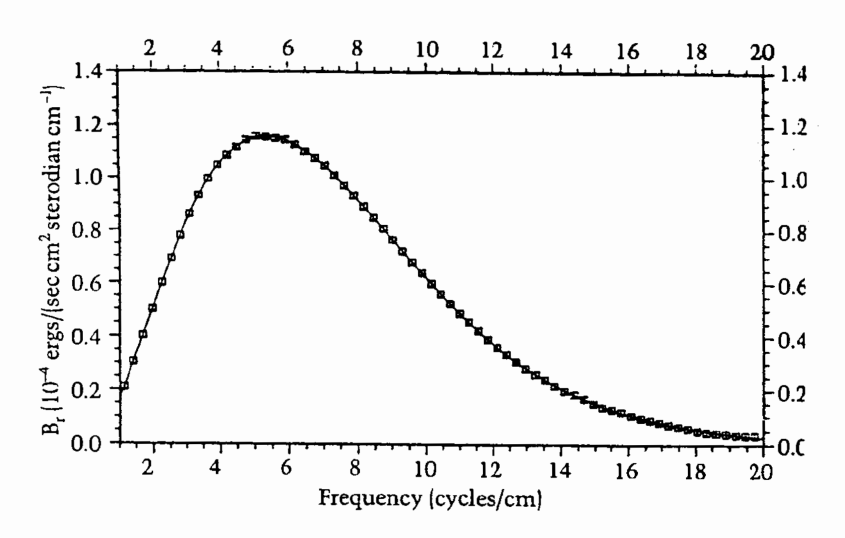


الشكل ٧,٣٤: بنزياس وويلسون، مع هوائيّهما الذي يشبهُ القَرْن.

Journal عامَ ١٩٦٥، في إحساسِ علماءِ الكونياتِ بما هو أعظمُ مِن ذلك العنوانِ الأرضيِّ المتواضع.

ولقد حدّدَ بنزياس وويلسون درجةَ حرارةٍ من $_{3.5}$K، لهذا الإشعاعِ الإضافيّ، علىٰ افتراضِ أنه إشعاعٌ مِن النوعِ الذي يصدرُ عن جسم أسود black body type of radiation. وكانت عمليةُ التقدّمِ نحو الحصولِ علىٰ طيفٍ كاملٍ، لجسم مظلم، بطيئةً ولكنْ أكيدة، نظراً لتقدّمِ مجموعاتٍ متعدّدة لقياسِ الإشعاعِ علىٰ موجاتٍ طوليَّةٍ مختلفة. ويُرينا الشكلُ ٧,٣٥ أكثرَ تلك الجهودِ لفتاً للانتباه، وهي تلك التي تعودُ إلىٰ القمرِ الصناعيِّ المستكشِفِ للخلفيةِ الكونية (COBE). إنَّ منحنىً لدرجةِ حرارةِ جسمٍ أسودَ مِن $_{2.7}$K لهو رقمٌ يتّفقُ تماماً مع المُعطيات. ولأنَّ معظمَ طاقةِ هذا الإشعاعِ تقعُ في منطقةِ الأشعةِ الدقيقة (المايكرو ويف)، فإنَّ خلفيةَ الإشعاعِ هذه تُعرَفُ عادةً **بخلفية الأشعةِ الدقيقة microwave background**.

ولقد أُصيبت فكرةُ غامو الأصليةُ، في صنع النواةِ الأوليَّةِ، بضربةٍ قوية، في ستيناتِ القرنِ العشرين، عندما أدركَ العلماءُ أنّ كميةَ الهيليوم في العالَم، وهي تؤلفُ نحواً مِن رُبع مجموعةِ الكتلةِ الملاحَظَةِ، هي أكبرُ بكثيرٍ ممّا يمكنُ أن تُنتجَهُ النجومُ في مَسارِ حياتِها. وهكذا فلقد كانت هناك حاجةٌ إلىٰ مصدرٍ إضافيٍّ لهذا الهيليوم، وقد زَوَّدَ العالَمُ المُبَكِّرُ الجوَّ المناسبَ لذلك تماماً. ويمكنُ للإنتاجِ الأوليِّ للهيليوم أن يرتفعَ ليصلَ إلىٰ حدِّ ٩٠٪ مِن المُشاهَدِ منه، وأمّا الباقي فإنَّ النجومَ تتكفّلُ به. وقد زوّدتْنا دراسةٌ لروبرت



الشكل ٧,٣٥: يتفقُ منحنىٰ الجسم الأسودِ مع عددِ القياساتِ الكبيرةِ التي قامَ بها القمرُ الصناعيُّ المستكشفُ للخلفَيةِ الكونيّة Cosmic Background Explorer (COBE)، في عامِ ١٩٨٩. ويُرينا هذا طيفَ الخلفيةِ الكونيةِ في قطبِ مجرّتنا الشماليّ.

واغونير، وويليم فاولر، وفريد هويْل، في عامِ ١٩٦٧، بنسخةٍ مُصحَّحَةٍ ومُحَدَّثَةٍ مِن دراسةِ غامو السابقة، وزادت مِن مصداقيةِ سيناريو صنعِ النواةِ الأولية.

فيزياءُ الجُسَيماتِ الفلكية Astroparticle physics

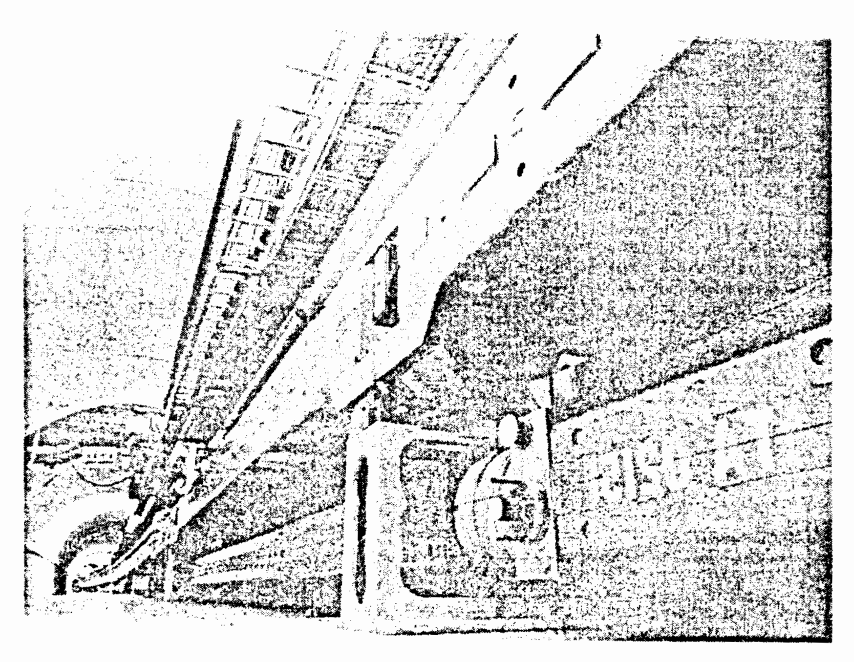
إنَّ فيزياءَ الجسيماتِ الفلكيةِ هي السببُ في أنَّ فكرةَ الانفجارِ الكبير قد صارت تتمتّعُ، منذُ سبعيناتِ القرنِ العشرين، بوضعِ «أكثرِ النظرياتِ تفضيلاً» في علمِ الكونيات. ولقد صارَ علماءُ الكونياتِ أكثرَ جرأةً في استنتاجاتهم لِحِقَبٍ هي أقدمُ وأقدمُ مِمَّا تعرّضَ له غامو. ومِن المُثيرِ للسخريةِ أنَّ مدرسةَ علماءِ الجسيمات particle - theorist school، والتي اعتَبَرَتْ في أربعيناتِ وخمسيناتِ القرنِ العشرين أنَّ أفكارَ غامو هي أغربُ مِن أنْ تُصَدَّق، قد انحازت إلىٰ جوقةِ نظريةِ الانفجارِ الكبيرِ الرائجة، فيما يُعرَفُ **ببرنامجِ فيزياءِ الجسيماتِ الفلكية astroparticle physics programme**. أمّا أُسسُ هذا البرنامجِ فهي كالتالي:

يهتمُّ علماءُ فيزياءِ الجُسيماتِ بالبحثِ عن نظريةٍ موحَّدةٍ للفيزياءِ تجمعُ كلَّ التفاعلاتِ الفيزياويةِ المعروفةِ ولكن المختلفة، كالتفاعلِ الكهرومغناطيسيّ، والتفاعلاتِ التي تحدِّدُ

سلوكَ نَوىٰ الذرات، والجاذبيةِ بالطبع. وتوحي البحوثُ النظريةُ بأنَّ مِثْلَ هذا التوحيدِ، لو كان موجوداً حقّاً، فإنه سوف يتكشَّفُ عندما تتفاعلُ جسيماتُ المادةِ في طاقاتٍ هي غايةٌ في الارتفاع.

ويستخدمُ الفيزياويونَ مُسَرِّعاتٍ accelerators ضخمةً وفعالةً في سيرن أو في فيرميلاب CERN or Fermilab (الشكل ٧,٣٦)، لدراسة تفاعلاتِ الجسيماتِ ذواتِ الطاقةِ العالية. ولكنَّ أعلىٰ هذه الطاقاتِ التي يمكنُ الحصولُ عليها مِن خلالِ هذهِ المسرِّعاتِ لا تصلُ إلىٰ الهدفِ المنشودِ الذي نحتاجُ إليه للتوحيدِ بعاملٍ ضخم أكبرَ مِن مليونِ بليون! وبعبارةٍ أخرىٰ، فإنه لا أَمَلَ لعلماءِ الجسيماتِ في أن يجدوا أَيَّ مختبرٍ يمكنُ أن يختبرَ نظريتَهم التوحيدية، ما لَمْ. . .

ما لَمْ يعتبروا العالَمَ المتوسّعَ علىٰ أنه مختبرُهُم. ذلك لأننا عندما نتفحّصُ العالَمَ أقربَ وأقربَ إلىٰ حِقبةِ الانفجارِ الكبير، مِن خلالِ النظرِ إلىٰ مجرّاتٍ أبعدَ وأبعد، فإننا نجدُ أنّ درجاتِ حرارتِها آخذةٌ في الارتفاعِ، وكنتيجةٍ لذلكَ فإنَّ الجسيماتِ تصبحُ كلُّها أكثرَ وأكثرَ فعالية. وهكذا فلقد وجدَ غامو درجاتِ حرارةٍ تَقْرُبُ مِن عشرةِ بلايين درجةٍ،



الشكل ٧,٣٦: مُسارعٌ للجسيماتِ في فرميلاب، في إلينويس، الولايات المتحدة الأمريكية.

بعدَ ثانيةٍ واحدةٍ مِن الانفجارِ الكبير. ولسوفَ يجِدُ فيزياويو الجسيماتِ درجةَ حرارةٍ هي أكبرُ بِبَليونِ بَليونِ مرّةٍ عمّا كانت عليه في حِقبةٍ أَسْبَق، عندما كان عمرُ العالَم لا يتجاوزُ جزءاً واحداً مِن بليونِ بليونِ بليونِ جزءٍ مِن الثانية الواحدة. وسوف تكونُ مِثلُ هذهِ الحقبةِ مثيرةً لاهتمام عالِم الجسيماتِ الفلكيةِ، لأنَّ الجسيماتِ كانت تمتلكُ عندئذٍ طاقاتٍ عاليةً بما يكفي حتىٰ يمكَنَ أن يصيرَ توحيدُ التفاعلاتِ المهمةِ كلِّها، باستثناءِ الجاذبيةِ، حقيقةً واقعة. وهكذا فقد يمكنُنا أن نقولُ بأنَّ لفيزياويِّ الجسيماتِ اهتماماً راسخاً بنماذج الانفجارِ الكبير.

تكوينُ البِنيةِ الواسعة[1] Formation of large-scale structure

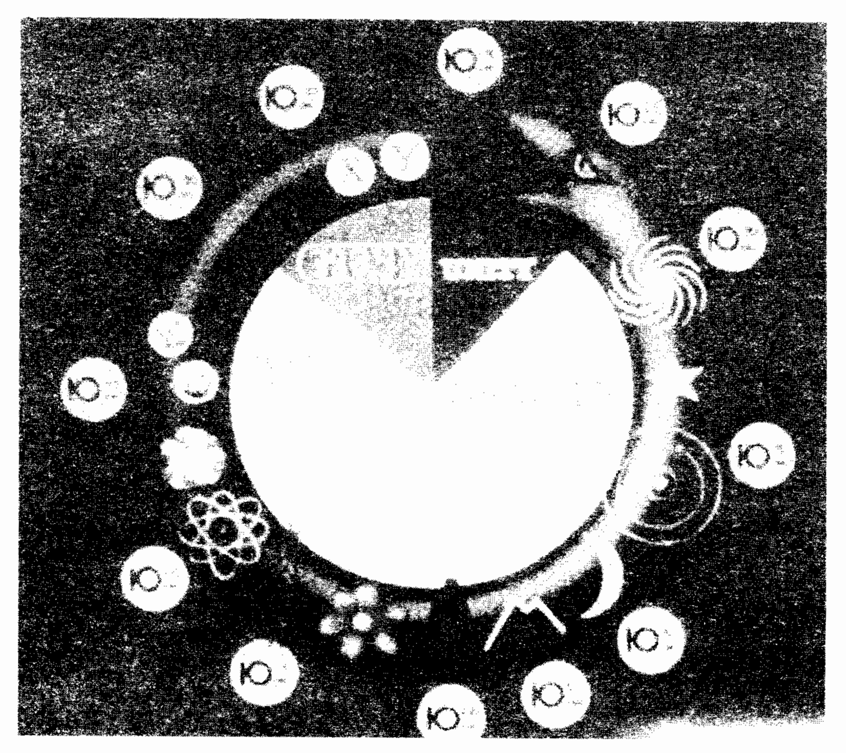
كيف يمكنُ لعالِم الكونياتِ أن يستفيدَ مِن هذا الجُهدِ المشترَك؟ إنّ المعضِلةَ الأساسيةَ الباقيةَ التي يتحتّمُ فكُّ رموزِها، في علمِ الكونيات، تتمثّلُ في سؤالِنا: كيف خَرجَتْ بِنيةُ العالَم الواسعةُ (انظرْ الأشكال ٧,١٢ ـ ٧,١٦) مِن عباءةِ نماذجِ الانفجارِ الكبير؟ فلنتذكّرْ بأننَا قد افترضنا، حتىٰ نُبَسِّطَ الحسابات، بأنّ الكونَ **متجانسٌ**. ويتوجّبُ علينا الآنَ أن نُعيدَ تفحُّصَ إمكانيةِ أنَّ الكونَ لم يكنْ متجانساً تماماً في أوَّلِ الأمر، وأنّه كانت فيه حينئذٍ أمكنةٌ ضئيلةٌ غيرُ متجانسة، ثُمَّ نَمَتْ هذه إلىٰ ما نراهُ اليومَ مِن مجرّاتٍ، وعناقيدَ وعناقيدَ عملاقةٍ superclusters، وخُيوطٍ filaments، وفراغات voids.

قامَ شيلدن غلاشو، وهو أخصائيٌّ في فيزياءِ الجسيمات، بإحياءِ أفكار الأسطورةِ الهنديةِ للأفعىٰ التي تبتلعُ ذيلَها (انظرْ الشكل ٧,٢)، مِن خلالِ ربطِ أكبرِ وأصغرِ البِنىٰ في العالَم في الصورةِ التي تظهرُ في الشكل ٧,٣٧ لأفعىٰ مشابهة. ويأملُ فيزياويّو الجُسيماتِ الفلكيةِ في إعطاءِ أحوالٍ لبدايةِ الكونِ معقولةٍ إلىٰ حدٍّ ما، ونشأتْ منها تلك البِنىٰ. وتدورُ عمليةُ البحثِ الرئيسيةُ في عِلْم الكونياتِ، اليومَ، حولَ هذه الفكرةِ بالضبط. والدليلُ الذي نتعلّقُ به، وسطَ كلِّ هذه التكهناتِ، يكمنُ في اكتشافِ خلفيةِ إشعاعاتِ الأشعةِ الدقيقةِ مِن النوعِ الذي اكتشفَهُ مستكشِفُ الخلفيةِ الكونيةِ «COBE» أولاً.

ذلك لأنّ القمرَ الصناعيَّ التابعَ لِـ«COBE» قد سَجَّلَ نجاحاً آخرَ باهراً، في عام ١٩٩٢، عندما تمكّنَ مِن الكشفِ عن بِنيةٍ محبَّبةٍ بحبوبٍ دقيقةٍ للغاية، في خلفيةِ إشعاعاتِ الأشعةِ الدقيقةِ التي كانت، حتىٰ ذلك الوقت، تبدو ملساء. كانت هذهِ البِنيةُ

---

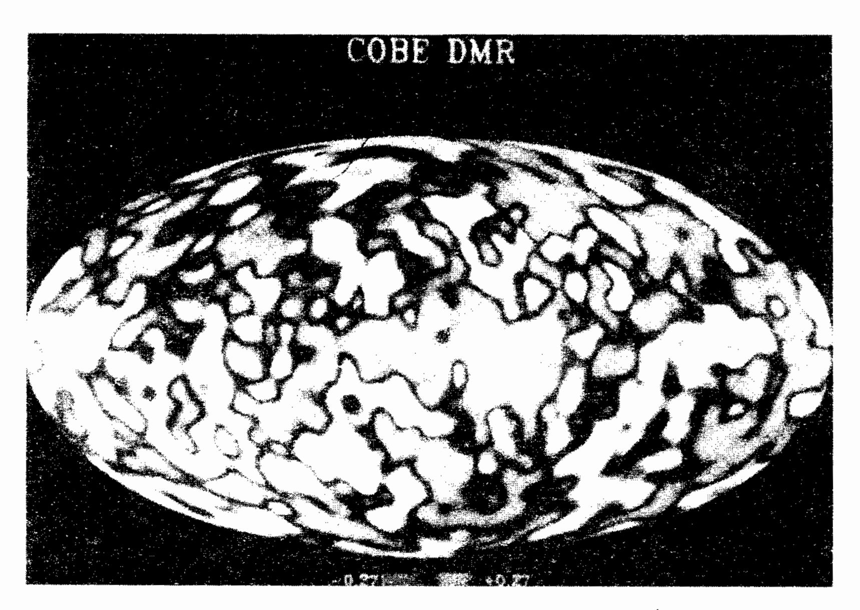
(١) تعودُ إلىٰ القاموس، لتبحث عن معنىٰ كلمة structure، فلا تجدُ غيرَ لفظِ البِنْيَة، والبناء، إنّه اللفظُ نفسُه الذي جاء في كتاب اللّه: ﴿والسماء بنيناها بأييد وإنّا لموسعون﴾ [الذاريات: ٤٧]. د.س



الشكل ٧,٣٧: في أفعىٰ غلاشو تقعُ أصغرُ الجُسيماتِ في الذيلِ، ثم هي تكبرُ وتكبرُ بالاتجاهِ نحو الفمّ. إنَّ ابتلاعَ الذيلِ يوحي بأنَّ البِنىٰ الأكبرَ والأصغرَ تتّصلُ ببعضِها البعض اتصالاً وثيقاً.

(الشكل ٧,٣٨) علىٰ شكلِ ارتفاعاتٍ وانخفاضاتٍ في درجةِ الحرارةِ الموضعيةِ في السماء، وباتجاهاتٍ مختلفة، ولقد وَجَدَ مُستكشِفُ «COBE»، في مساحاتٍ تقابلُ درجةً تقرُبُ مِن ١٠ درجاتٍ، أنّ درجاتِ الحرارة تتقلّبُ بمقاديرَ تشكّلُ أجزاءً قليلةً مِن مَليونِ جزءٍ مِن الثانيةِ الواحدة!

وفي واقعِ الحالِ، فلقد جَلَبَ اكتشافُ ذلك المُستكشِفِ، للعلماء، في أوّلِ الأمرِ، ارتياحاً عميقاً، وهم الذين كانوا يبحثونَ، مِن دونِ طائلٍ، عن أيّةِ علامةٍ تَدُلُّ علىٰ انعدامِ التجانسِ في بقايا ذلك الإشعاعِ القديم. ذلك لأنّ مِن المنطقيّ أنَّ أيّةَ تقلّباتٍ في توزيعِ المادةِ (التي تنمو إلىٰ بِنىً كبيرةٍ) يجبُ أن تترافقَ مع تقلُّباتٍ مُشابهةٍ في الإشعاع. وإنَّ مِن العسيرِ أن نتصوّرَ بأنَّ المادةَ كانت مُوزَّعَةً بصورةٍ غيرِ متجانسةٍ، بينما أن الإشعاعَ لم يكنْ كذلك. أمّا قبلَ عامِ ١٩٩٢، فلقد فشلتِ البحوثُ المبكّرةُ المبنيةُ علىٰ الدراساتِ الأرضيةِ



الشكل ٧,٣٨: أُنموذَجٌ لِعَدَم تجانسِ درجةِ حرارةِ خلفيةِ الأشعةِ الدقيقة «المايكرو ويف»، كما كشَفَ عنها المستكشِفُ «COBE»، في عامِ ١٩٩٢ «موافقةٌ مِن فريق COBE و NASA».

في خلفيةِ الأشعةِ الدقيقةِ، في الكشفِ عن أيِّ عدمِ تجانس.

ولكنْ سرعانَ ما حلَّ الحَذَرُ مَحَلَّ الفرحةِ الطاغيةِ أوّلَ الأمرِ، بِوجدانِ آخرِ دَلالةٍ عن الكون، حيث صارَ مِن الجليِّ أنَّ حَلَّ معضلةِ تكوينِ البنىٰ الكونيةِ ليس بالشيءِ اليسيرِ بَعْدُ. وهناك كابِحٌ واحدٌ يتمثّلُ في أنّ المرءَ لا يمكنُ أن يفترضَ بأنّ المادّةَ، كلَّ المادّةِ، تتفاعلُ مع الإشعاع. ولو كان ذلك هو ما حَدَث فإذاً لَتَرَكَ بَصَماتٍ أكثرَ تَنُمُّ عن عَدَمِ تجانسِ المادةِ علىٰ الخلفيةِ الإشعاعية، بَصَماتٍ هي أكبرُ بكثيرٍ ممّا وَجَدَهُ المستكشِفُ «COBE». وهكذا فلقد صارَ علىٰ علماءِ الكونياتِ أن يخترعوا شكلاً خاصاً مِن المادةِ **لا** يتفاعلُ مع الإشعاع. وليس ذلك وحسب، ولكن تَوَجَّبَ عليهم أيضاً أن يفترضوا بأنّ هذا النوعَ الغريبَ مِن المادةِ **يُشكِّلُ ما يقرُبُ مِن تسعينَ بالمائةِ مِن المادةِ كلِّها في الكون**. كما يتوجّبُ أن لا يكونَ لمادةٍ كهذه أيُّ تفاعلٍ مع أيِّ نوعٍ مِن أنواعِ الإشعاع، ولذا فإنّ هذه المادةَ ستكونُ مظلمةً لِخُلُوِّها مِن أنواعِ الضوء كلِّها dark to all kinds of light.

فلْنتفحّصِ الآنَ الأدلّةَ علىٰ وجودِ المادةِ المظلمة dark matter، وهي أدلّةٌ لا تزالُ تتجمّعُ لدينا من خلالِ دراسةِ علمِ الفلك لما وراءَ المجرّات extragalactic astronomy.

ولسوف يكونُ مِن المثيرِ أن نرىٰ إن كانت مِن النوعِ والكميةِ الصحيحيْنِ اللّذيْنِ تحتاجُ إليهُما سيناريوهاتُ تكوينِ ونشوءِ البِنيةِ الكونية.

المادةُ المظلمة Dark matter

المادةُ المظلمةُ هي شيءٌ مخادِع، وهي قد تنشأُ عنها نتائجُ واسعةٌ جداً في عِلمِ الكونيات. وكما ذكرْنا مِن قبلُ، فإنّ مِن العسيرِ أن نقدّرَ كثافةَ المادةِ الموجودةِ في الكونِ، في الحقبةِ الحاضرة، ولكنْ لو صارَ ذلك مُمْكِناً، فلسوفَ يصبحُ في إمكانِنا أن نقرِّرَ إنْ كنّا نعيشُ في عالَمٍ مفتوحٍ أو مغلَقٍ open or closed universe[١].

وتتمثلُ المعضلةُ، في الأساس، في أنّ الفلكيينَ ليسوا متأكدين إن كانت المادةُ التي **يرونَها** في العالَمِ تُمدّهم بتقديرٍ جيّدٍ للكثافةِ الكلية. ذلك لأنّ ثمّةَ دلائلَ أكيدةً علىٰ أنَّ المادةَ المظلمةَ، وهي ما لا يمكنُ الكشفُ عنه اعتيادياً باستخدامِ المَراقبِ المختلفة، توجدُ في العالَمِ بكمياتٍ كبيرة.

وتجيءُ الأدلةُ في مجاليْنِ اثنينِ مختلفيْن، ويوجدُ أحدُهما في المجرّات المنفردة، بينما يوجدُ الآخرُ في عناقيدِ المجرّات. فلننظرْ في ذلك نظرةً سريعةً، وبالترتيبِ ذاته. إنّ الملاحظةَ الأساسيةَ للمجرّاتِ تتمُّ مِن خلالِ دراسةِ حركةِ سُحُبِ الهايدروجين المتعادلة clouds of neutral hydrogen. وتتحرّكُ مِثلُ هذه السُّحُبِ تحت تأثيرِ جاذبيةِ مجرّةٍ ما، مثلما تدورُ الكواكبُ السيارةُ حول الشمس.

ولْنَنظُرْ، أولاً، في أمرِ معضلةٍ تواجهُنا في منظومتنا الشمسية. نحن نعلمُ بأنَّ الأرضَ تدورُ حول الشمسِ مرّةً في عامٍ واحد. ولكنْ، هل يمكنُ أن تُنبِئَنا هذه المعلومةُ عن كتلةِ الشمس؟ نعم، يمكنُها ذلك، ولكنْ بشرط أن نعرفَ أيضاً بُعدَ الأرضِ عن الشمس. وإذا ما تسلّحْنا بهذه المعلومةِ، فسيصيرُ في إمكانِنا أن نحسبَ كتلةَ الشمس، باستخدام قانونِ الجاذبية. ولو قُمنا بالشيءِ ذاتِه، علىٰ مدارِ المرّيخِ أو المشتري، لحصلْنا علىٰ الجوابِ ذاته.

وهذا ما لا ندهَشُ له كثيراً، لأنَّ الكواكبَ السَّيارةَ تتحركُ كلُّها حسَبَ نمَطٍ محدّد،

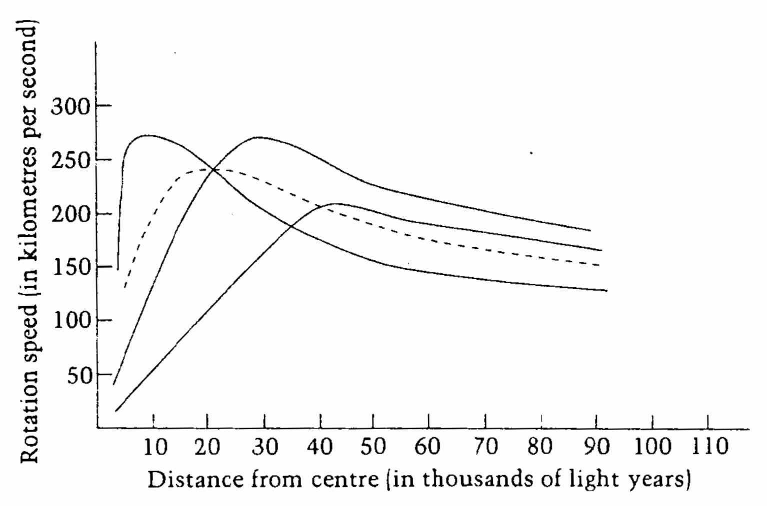
---

(١) يبدأ الكونُ «المغلقُ» و«المفتوحُ» من الصفر، أي أنهما يبتدئان من العدم، فهما مخلوقان. والكونُ، في كلتا الحالتين، يتوسعُ منذ خلقه شيئاً فشيئاً. ويبقى الكون، في نظرية «الكون المفتوح»، آخذاً في التوسع. وأما في «الكون المغلق» فنعني به أنه، وبعد نشوئه وتوسعه، يأخذ بالانكماش ثانية. د.س

وهو أمرٌ بَيَّنَتْهُ قوانينُ نيوتنَ الثلاثةُ لحركةِ الكواكبِ السّيارة. وتُنبئُنا القوانينُ الكِبْلَرِيّة بأنّ السّرعاتِ التي تدورُ بها الكواكبُ السّيارةُ حولَ الشمسِ تتناقصُ تدريجياً كلّما نظرْنا إلىٰ الكواكبِ السّيارةِ الأبعدِ والأبعد. إنَّ معدّلَ سرعةِ دورانِ الأرضِ هو أكبرُ بقليلٍ مِن ستّةِ أضعافِ معدّلِ سرعةِ دوران بلوتو، مثلاً.

كما يُتَوَقَّعُ أن تنطبقَ القوانينُ الكپلويةُ، أيضاً، علىٰ سُحُبِ الهايدروجينِ المتعادلِ الذي يدورُ حولَ المجرّات. ونحنُ نتوقّعُ بأنّ السحابةَ الأبعدَ عن مركزِ المجرّةِ سوف تتحرّكُ بأبطإٍ مِن سرعةِ حركةِ سحابةٍ أقربَ نسبياً إلىٰ المركز. ومِن المعلومِ أنّ الهايدروجينَ السائلَ يشعُّ في ٢١ سنتمتراً. وباستخدامِ هذا الطولِ الموجيِّ لغرضِ الرَّصدِ، فلقد صارَ الفلكيونَ يقيسونَ معدّلاتِ سرعةِ سُحُبٍ كهذه. ولَشَدَّ ما كانت دهشتُهم عندما توصلوا إلىٰ نتائج مِن النوعِ الذي يظهرُ في الشكل ٧,٣٩. **إنّ السرعاتِ تبقىٰ ثابتةً، تقريباً، علىٰ مسافاتٍ تبلغُ ثلاثةَ أضعافِ حدِّ رؤيةِ المجرّة**. فلماذا هي لا تصبحُ أصغرَ وأصغرَ بالنسبة إلى السُّحُبِ الأبعد؟

إذا ما لَمْ نَرْتَدَّ عن الاعتقادِ بقوانينِ نيوتنَ والنسبيةِ العامة، فلا بدَّ أن نفترضَ بأنَّ المادةَ الجاذبةَ التي تُحرِّكُ هذهِ السُّحُبَ (مثلما تُحرِّكُ الشمسُ الكواكبَ السّيارةَ حولَها) تمتدُّ إلىٰ ما هو أبعدُ مِن الحافّةِ المرئيةِ للمجرّةِ بكثير. إنها المادةُ المظلمةُ في المجرّة. وكتلتُها ليست بالقليلِ الذي يمكنُ إهمالُه، إذ هي قد تتجاوزُ حتىٰ الكتلةَ المرئيةَ في المجرّة!



الشكل ٧,٣٩: منحنياتُ دورانِ بعضِ المجرّات.

وأمّا الخَطُّ الثاني مِن البرهانِ فهو يجيءُ مِن الأدلّةِ التي نحصلُ عليها مِن عناقيدِ المجرّات. خذْ مثلاً عنقودَ الذُّؤابةِ Coma cluster، التي تظهرُ في الشكل ٧,١٥. إنَّ لها مجرّاتٍ مرئيّةً تظهرُ علىٰ شكلِ نُقَطٍ ساطعة. ويمكنُ للمرءِ أن يقيسَ حركاتِها داخلَ العنقود، وأن يقدِّرَ كميةَ الطاقةِ الموجودةِ في تلك الحركة. ونقولُ مرّةً أخرىٰ إنّنا إذا ما اعتقدْنا بأنّ تلك المجرّاتِ كانت تتحرّكُ إحداها تحت تأثيرِ الأخرىٰ، وبما يكفي مِن الوقتِ حتىٰ تستقرَّ في حالةٍ مِن التوازنِ الحركيّ، فقد يُمكِنُ لنا أن نُقدِّرَ، مرّةً أخرىٰ، كميةَ الكتلةِ الجاذبةِ في العنقود. أمّا الجوابُ فهو **إنّ ما يصلُ إلىٰ عشرةِ أضعافِ المادةِ المرئيةِ، والتي نراها علىٰ شكلِ مجرّاتٍ، موجودةٌ هناك ولكن لا يمكنُ رؤيتها**[١].

ولقد شكّلت المادةُ المظلمةُ معضلاتٍ مستعصيةً للفلكيين، فهُم يتوجّبُ عليهم أن يحزموا أمرَهم ويقرّروا مِمَّ تتركبُ هذه المادة. وهناك خياراتٌ تقليديةٌ وأخرىٰ غيرُ تقليديةٍ في تفسيرِ كُنْهِ هذه المادة[٢]. إذ يمكنُنا أن نعتبرَها، مثلاً، علىٰ أنها توجدُ علىٰ شكلِ كُتَلٍ مِن الكواكبِ السّيارة، كالمشتري Jupiter مثلاً. أو أنَّ هذه الأجرامَ قد تكونُ أكبرَ مِن ذلك، ولكنها ليست مِن الكِبَرِ بما يكفي حتىٰ تصبحَ نجوماً مثلاً. والنجومُ التي هي كالشمسِ تمتلكُ درجاتِ حرارةٍ عاليةً في مركزها تكفي لتفجيرِ تفاعلٍ اندماجيٍّ فيها. ولكنَّ كرةً مِن الغازِ ذاتَ كتلةٍ تبلغُ مِعشارَ كتلةِ الشمس قد لا يكونُ لها مركزٌ يمتلكُ السخونة الكافية لذلك. إنَّ أمثالَ هذه الأجرامِ الصغيرةِ جدّاً سوف لن تُشاهَدَ بوسائلِ المشاهدةِ المُعتادة، وهي تُعرَفُ، علىٰ نطاقٍ واسعٍ، **بالأقزام السَّمراء** brown dwarfs[٣]. أو قد يمكنُك أن تفكّرَ بالنجوم الميتة، أي بالنجومِ النيوترونية neutron stars[٤] والأقزامِ البيضاء white dwarfs[٥]، والتي استهلكتْ وَقودَها النوويَّ، أو حتىٰ الثقوبِ السوداءِ black holes[٦]، والتي لا يمكنُ رؤيتُها بالطبع. وتتألفُ هذهِ الأجرامُ، كلُّها، مِن مادةٍ اعتياديةٍ يوجدُ معظمُها علىٰ شكلِ نيوتروناتٍ وبروتونات، وهي تُعرَفُ **بالمادةِ الباريونية** baryonic matter، لأنَّ النيوتروناتِ والبروتوناتِ تُصَنَّفُ، عامّةً، علىٰ أنها صنفٌ مِن الجسيماتِ التي تُعرَفُ **بالباريونات** baryons.

ولكنَّ علماءَ كونياتِ الانفجارِ الكبيرِ لا يستسيغونَ تماماً هذه الخياراتِ التقليدية. ويمكنُنا أن نقولَ، ومِن دونِ الدخول في التفاصيلِ التقنيةِ الدقيقة، إنّ مادةً باريونيةً كهذهِ

(١) (٣) (٤) (٥) (٦) ﴿فلا أقسم بما تبصرون. وما لا تبصرون. إنه لقول رسول كريم﴾ [الحاقّة: ٣٨ ـ ٤٠].

(٢) ﴿وما أوتيتم من العلم إلاّ قليلاً﴾ [الإسراء: ٨٥] صدق الله العظيم.

لا يمكنُها أن توجدَ في العالَم بأبعدِ مِن مستوىً منخفضٍ إلىٰ حدٍّ ما (إنَّ كثافتَها لا يمكنُ أن تتجاوزَ نسبةً قليلةً في المائةِ مِن الكثافةِ النهائية closure density). إذ لو كان الأمرُ كذلك لبرزتْ لدينا مشكلاتٌ في تفسيرِ وفرةِ الديوتيريوم deuterium التي نلاحظُها في العالَم. ولسوف تفشلُ عمليةُ صُنعِ النواةِ الأوليةِ في إنتاجِ ما يكفي مِن الديوتيريوم، لو تمَّ تعدّي حدّ كثافةِ المادةِ الباريونيةِ المذكور. وهناك معضلةٌ أخرىٰ تتمثّلُ في أنّ المادةَ الباريونيةَ تتفاعلُ مع الإشعاع، ولو كانت المادةُ تشكّلُ أكثرَ مِن جزءٍ صغيرٍ مِن المادة السوداء، وإذاً لَما أمكنَ لنا أن نفهمَ كيفيةَ نشوءِ المجرّاتِ والعناقيدِ في الكونِ مِن دونِ تسبيبِ اضطرابٍ في خلفيةِ الأشعةِ الدقيقةِ الناعمةِ جدّاً.

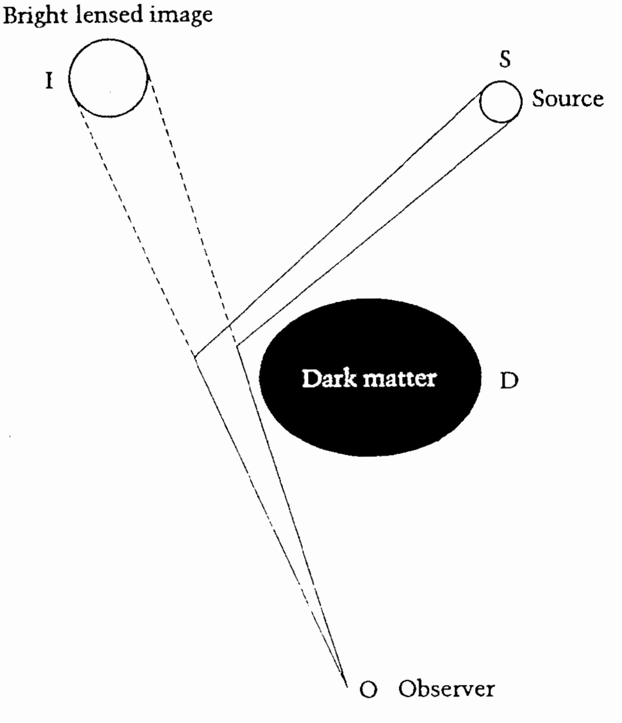
وكِلا الأمريْنِ هو مُغْرِقٌ في التقنيةِ بأكثر مِن أن يُمكنَ تفصيلُه هنا. ويكفي أن نقولَ إنَّ علماء كونياتِ الانفجارِ الكبيرِ ينظرونَ إليهما بعيْنِ الجدّ، وبما يكفي حتىٰ يرهقوا عقولَهم للحصولِ علىٰ بدائلَ محتمَلةٍ للمادةِ المظلمة dark matter. ولقد اقتُرِحَتْ خياراتٌ لموادَّ خفيّة عديدة من **المادةِ غيرِ الباريونية** non-baryonic matter، كالنيوترينوات neutrinos الضخمةِ، والفُوتِينَوات photinos، والغرافِيتونات gravitons، والاكسيونات axions، إلخ. ويَحْدِسُ وجودَ هذه الجسيماتِ أولئك الذين يدرسونَ البِنيةَ المجهريةَ النهائيةَ للمادة. ويُشار إلىٰ مثلِ هذه الجسيماتِ أحياناً علىٰ أنها «جسيماتٌ ضخمةٌ ضعيفةُ التفاعلِ البينيّ» WIMPs (weakly interacting massive particles). علىٰ أنه لم يُعْثَرْ بعدُ علىٰ أيٍّ مِن هذه الجسيماتِ في مُسارِعاتِ الجسيماتِ ذاتِ الطاقةِ العالية[(١)].

ولكن فلنختمْ هذا البيانَ عن المادةِ السوداء بأن نذكُرَ وسيلةً واحدةً، مثيرةً للاهتمام، للبحثِ عن الأجرامِ الكبيرةِ التي تُقاربُ الكواكبَ السّيارةَ في كُتَلِها، والأقزامِ السمراء، والنجومِ الميّتة إلخ، وكلُّها يقعُ ضمنَ الخيارِ الباريونيِّ الاعتياديّ. وتُعرَفُ هذه الطريقةُ **بالعَدْسِ المُجهريّ الجاذبيّ** gravitational microlensing.

ويصفُ الشكلُ ٧,٤٠ حَدَثاً عَدْسِيّاً مجهرياً أنموذجياً. افرضْ أننا نراقبُ نجماً يتحركُ عبْرَ هالةِ مجرّتِنا. فإذا ما اقتربَ في هذه العمليةِ جِرْمٌ مظلمٌ dark object مِن خطِّ رؤيتِه، فإنَّ النجمَ قد يكونُ يُعْدَسُ جاذبيّاً مِن قِبَلِ الجِرمِ المظلِم. ولسوف يزيدُ هذا الحدثُ مِن

---

(١) وذلك كلُّه، مرّةً أخرىٰ، هو مِمّا لا نبصر. د.س

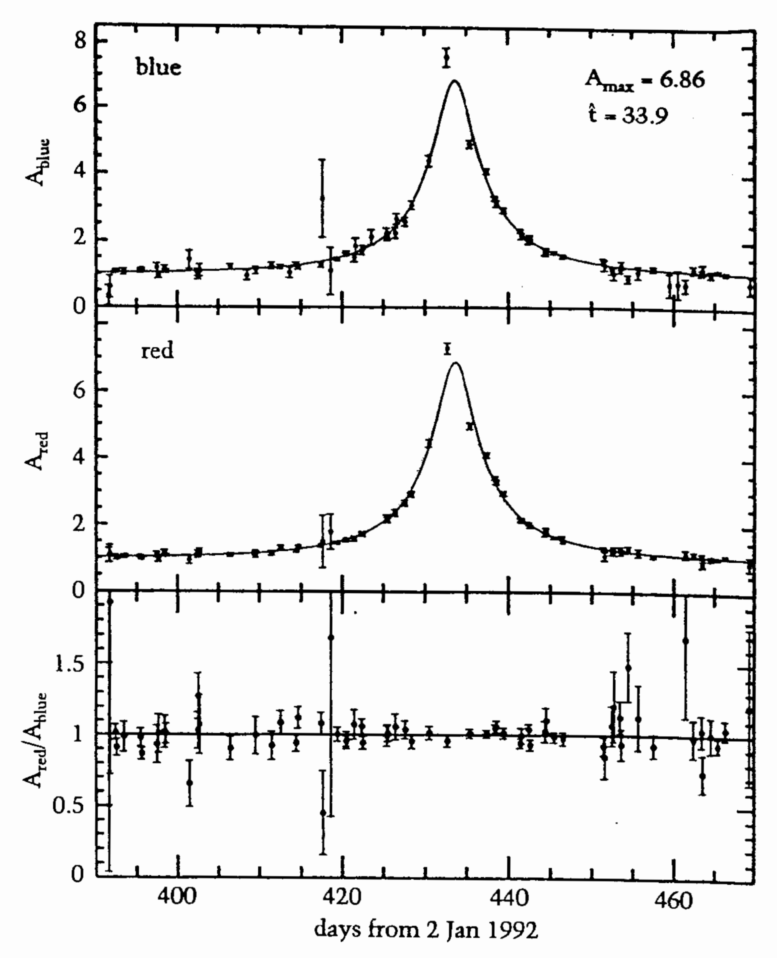


الشكل ٧,٤٠: هندسةٌ لِحَدَثٍ عَدَسِيٍّ مجهريٍّ أنموذجيّ.

سطوعِ النجم بصورةٍ مؤقتة، وكما يظهرُ في الشكل ٧,٤١. وقد يمكنُ للمرءِ مِن خلالِ مراقبةِ هذه النجومِ بيقظةٍ وحرصٍ، أن يكشفَ عن وجودِ مثلِ هذه الأجرامِ العَدَسِيّةِ الجاذبة.

وهناك تجربتانِ تُعرفانِ باسم «ماكو» MACHO (massive compact halo object) و«إيروس» EROS (expérience de recherche d'objets sombres)، وقد تمَّ البدءُ في إجرائِهما منذُ بعضِ الوقت، وسُجِّلَتْ نجاحاتٌ في الكشفِ عن مثلِ هذه الأجرام. ونسألُ: ما هي أعدادُ هذه الأجرام؟ وهل يمكنُ أن تكونَ المادةُ المظلمةُ كلُّها بهذا الشكلِ الاعتياديِّ الذي شهدْناهُ هنا؟ أم هل إننا نحتاجُ إلىٰ مادةٍ خفيّةٍ بكمياتٍ كبيرة، وكما هو الحالُ مع سيناريوهاتٍ عديدةٍ، لتكوينِ بنيةِ الجِرْم؟

إنّ المستقبلَ وحدَهُ هو الكفيلُ بالإجابةِ علىٰ هذه الأسئلة.



الشكل ٧,٤١: ارتفاعٌ وانخفاضٌ مُمَيَّزانِ في شدّةِ ضوءِ أحدِ النجومِ، كما نراهُ عند عَدْسِهِ مجهرياً مِن قِبَلِ كتلةٍ مظلمة.

نتيجة

لقد ابتعدْنا كثيراً عن ذلك السؤالِ الذي يبدو مُغْرِقاً في البساطة: لِمَ هي السماءُ مظلمةٌ في الليل؟

إنَّ قصَّةَ علمِ الكونياتِ الحديثِ لتمتدُّ مِن ظُلمةِ سماءِ الليلِ إلىٰ البحثِ عن المادةِ المظلمة، وهي تعتمدُ اليومَ علىٰ سَبْرِ أكثرِ أجزاءِ العالَم القصيّةِ إيغالاً في البعد، بالمَجَسّاتِ probes، وبأحدثِ الأجهزةِ التقنية، مِثْل اعتمادِها علىٰ استقراءِ الماضي

المجهول الذي يقتربُ مِن حِقبةِ الخلقِ المفترضةِ[1]، مِن خلالِ ما هو معروفٌ مِن العلم.

ولكنْ، وكما قد أنذَرَنا ج.ب.س. هالدين Haldane، **فإنَّ العالَمَ ليس هو أغربَ ممّا نظنُّ، ولكنّهُ أغربُ حتىٰ مِمّا يمكنُنا أن نظُنّ**[2].

the universe is not only queerer than we suppose, it is queerer than we can suppose. ومَن يدري، فلَعَلَّ ثَمَّةَ مفاجأة مخبّأة تنتظرُنا تجبِرُنا علىٰ أن نغيّرَ مِن نظرتِنا الراهنةِ إلىٰ العالَم. وعلىٰ أيةِ حالٍ، فإذا كان تاريخُ علمِ الفلكِ يشكّلُ أيَّ دليلٍ لنا، فلقد حانَ زمنُ تلك المفاجأة.

---

(١) لاحظ أننا قلنا «حقبة الخلق المفترضة»، ولم نقل «حقبة الخلق المفترَض»، لأن أمر خلق الكون قد صار، في العلم الحديث، أمراً مسلّماً. د.س

(٢) وسنظلُّ نردِّدُ خاشعينَ لِلّهِ تعالىٰ:
﴿ألم يأن للذين آمنوا أن تخشع قلوبهم لذكر الله﴾ [الحديد: ١٦].
﴿لو أنزلنا هذا القرآن علىٰ جبل لرأيته خاشعاً متصدعاً من خشية الله وتلك الأمثال نضربها للناس لعلهم يتفكرون﴾ [الحشر: ٢١]. د.س

خاتمة

ألغازٌ

كانت لنا، في هذا الكتابِ، إطلالةٌ علىٰ سبعٍ من أعاجيبِ الكون. وما إنْ نبتعد عن تُخومِ كوكبِنا الضيقةِ، فإنَّ العالَمَ الرَّحيبَ حولَنا لَيُطَالِعُنا بِمَشاهِدَ لجلالٍ وعظمةٍ متزايدَيْن، وإنّ كَوْنَنا قادرِينَ علىٰ التفكيرِ به وتفسيره لَهُوَ أعجوبةٌ في حَدِّ ذاتِه[1].

وحقّاً، لماذا يتوجّبُ علىٰ العلمِ الذي اكتسبناهُ من خلالِ تجاربِنا علىٰ موقعٍ ضئيلٍ كالأرض، وفيما لا يزيدُ عن الثلاثةِ قرون، أن ينطبقَ، بنجاحٍ، علىٰ ظواهرَ تمتدُّ إلىٰ بلايينِ السنينِ الضوئيةِ مِن المكان وبلايينِ السنينِ مِن الزمان؟

وقد يمكنُ لنا أن نخطوَ خطوةً أخرىٰ في هذا المضمار، لنُثيرَ سؤالاً أكثرَ فلسفيةً، وهو: لماذا يتوجّبُ، علىٰ أيّةِ حالٍ، أن تكونَ هناك أيّةُ قوانينَ للعلمِ تنظِّمُ مجرياتِ الكون[2]؟

---

(١) ﴿فتبارك اللّه أحسن الخالقين﴾ [المؤمنون: ١٤].

(٢) يكفي للرّدِ علىٰ الملحدين مِن الجاهلين، مِمَّنْ يسألونَ هذا السؤال، أنه لو توقّفَ قانونٌ كونيٌّ واحدٌ عن العمل، وهو قانونُ الجاذبيةِ الذي قد شَمَلَ كلَّ شيءٍ في الوجودِ طُرّاً، وإذاً لأَمّحىٰ الكون، ذلك الذي نعرفُه، وما فيه، والأرضُ ومَن عليها، ولم يَعُدْ هناك مِن وجودٍ لِمَنْ قد يسألُ مِثلَ هذا السؤال. ألا إنّه لا عِلْمَ مِن دونِ قوانينَ، وتقديرٍ، وميزان. ولو لم يكنْ ثمّةَ مِن قوانينَ، في الطبيعةِ البَتَّةَ، فإذاً لارتدَّ قلمُ الكاتبِ إلىٰ عينه فسَمَلَها، بَدَلَ أن يسيلَ بالحبرِ علىٰ الورقة التي يكتبُ فيها، لِتغَيُّرِ الإشارةِ الكهربائيةِ التي يُرسلُها دِماغهُ مِن خلالِ أعصابِ الذراعِ واليد، ولطارَ القلمُ مِن يدِهِ لِعَدَمِ وجودِ قانونٍ لجاذبيةٍ يجذبُ يدَه، بل ماذا أقول؟ بل لانهَدَّت الأرضُ والجبالُ بعيداً فامَّحَتْ حياتُه وحياةُ مَن علىٰ الأرضِ جميعاً لِذهابِ قانونِ الجاذبية. ألا إنَّ كلَّ ما في الكونِ جميعاً يجري بنظام، وتقدير، وميزان، وعَميت عينٌ لم تَرَ خَلْقَ الخالقِ في خَلْقِه، ولم تَرَ الجمالَ الذي يَلُفُّ كلَّ شيءٍ في الكونِ مِن أصغرِه إلىٰ أكبرِه، إذْ إنَّ الجمالَ نظامٌ =

لن أدخلَ في مناقشاتِ لهذه التساؤلات، إذ لم يكن هدفي مِن إثارَتِها تبيانَ النجاحِ العظيم لجهودِ الإنسانِ تجاه ضخامةِ وتعقيدِ الكون وحَسْب، وإنما للتعبيرِ أيضاً عن الحذرِ من أنَّ العلمَ الذي اكتسبناه، حتىٰ اليوم، ليس كاملاً بالضرورة. ومَن يدري، فقد يفجِّرُ الكونُ أعاجيبَ أخرىٰ تستدعي أن نضيفَ شيئاً جديداً إلىٰ فهمِنا للعلمِ ذاته.

فلا يتوجّبُ أن نندهشَ أبداً إذا ما وجدْنا أنه لا تزالُ هناك مظاهِرُ محيِّرةٌ للكونِ يتوجّبُ تفسيرُها. ولسوف يخيبُ أملُنا، حقّاً، إذا نحنُ لَم نجدْ شيئاً منها.[1]

ولسوف أعدِّدُ هنا بعضاً مِن الألغازِ والمُعْمَياتِ التي لا تزالُ تستدعي منّا التفكّرَ والتأمّل، لا بل إنها قد تضيفُ شيئاً جديداً إلىٰ فهمِنا للعلومِ الأساسية[2].

لُغْزُ النيوترينو الشمسيّ The solar neutrino puzzle

الشمسُ هي أقربُ نجم إلينا، وهي النجمُ الذي يمكنُ أن نراقبَه وندرسَه بأقربَ مِن أيِّ نجمِ آخر. إلاّ أنَّ هناك لُغزاً محيّراً يتّصلُ بالشمسِ قد تحدّىٰ أيَّ حلٍّ حتىٰ الآن.

وكما قد أشرْنا في الفصلِ الثاني، فإنّ الشمسَ تولِّدُ الطاقةَ، في الوقتِ الحاضرِ، مِن خلالِ سلسلةٍ مِن التفاعلاتِ النوويةِ التي تنتجُ دَفقاً كبيراً مِن النيوترينو neutrino. ويمكنُ للنيوترينو أن يهربَ مِن أعماقِ الشمسِ البعيدةِ بكلِّ يُسْر، لأنّ النيوترينواتِ لا تكادُ تتأثرُ بالمادةِ التي حولَها (قارنْ هذا السلوكَ بسلوكِ الفوتوناتِ photons المضادّ، والتي تُصْدَمُ صَدْماً عنيفاً قبلَ أن تخرجَ مِن الشمسِ في نهايةِ المطاف).

ويبيّنُ الشكلُ «خ ـ ١» تجربةً في أعماقِ الأرضِ، في منجمِ هومستيك، قامَ بها ر. ديفز، للكشفِ عن النيوترينو القادمِ من الشمس. ورغمَ أنَّ هذه التجربةَ قائمةٌ منذ حوالىٰ عامِ ١٩٧٠، فلقد كانت النتيجةُ، حتىٰ الآنَ، مخيّبةً لآمال العلماء، إذ إنّ

= وقانونٌ يسود كلَّ المخلوقات، وهيهاتَ أن يكونَ الأمرُ غير ذلك، وإذاً لَما كانَ للكونِ مِن وجودٍ أصلاً. إنَّ الكلَّ ينشدُ الجَمال، فهل إنَّ ثَمّةَ مِن جمالٍ مِن دون نظام؟

﴿إنا كل شيء خلقناه بقدر. وما أمرنا إلاّ واحدة كلمح بالبصر. ولقد أهلكنا أشياعكم فهل من مدكر. وكل شيء فعلوه في الزبر. وكل صغير وكبير مستطر﴾ [القمر: ٤٩ ـ ٥٣]، كلُّ شيءٍ مُقَدَّرٌ بِقَدَرِه، وكلُّ شيءٍ صغيره وكبيره مسطورٌ مكتوب.

﴿. . وخلق كل شيء فقدره تقديراً﴾ [الفرقان: ٢]. د.س

(١) ولسوف يظل الأمر كذلك. أوَلَمْ يخبرنا الحقُّ سبحانه وتعالى ﴿وما أوتيتم من العلم إلاّ قليلاً﴾ [الإسراء: ٨٥]؟ د.س

(٢) ﴿ويخلق ما لا تعلمون﴾ [النحل: ٨]. د.س

الكاشِفَ لا يلتقطُ مِن نيوترينواتِ الشمسِ ما يكفي مثلَما تريدُنا نظريةُ الاندماجِ النوويِّ أن نعتقد. وهذا التعارضُ، حيثُ لا يتمُّ الكشفُ إلاّ عن نحوِ الثُّلُثِ مِن عددِ النيوترينواتِ المتوقعةِ، لَهُوَ أمرٌ خطير، وهو مَدْعاةٌ لقلقِ العلماء. فهل إنَّ الجهازَ الكاشفَ لا يعملُ بصورةٍ صحيحة؟ هل إنّ نظريةَ التركيبةِ الداخليةِ للشمسِ ليست صائبةً تماماً؟ هو توجدُ فجوةٌ ما في فهمِنا للتفاعلاتِ النووية؟ أم إنَّ فهمَنا للنيوترينو لا يزالُ منقوصاً؟

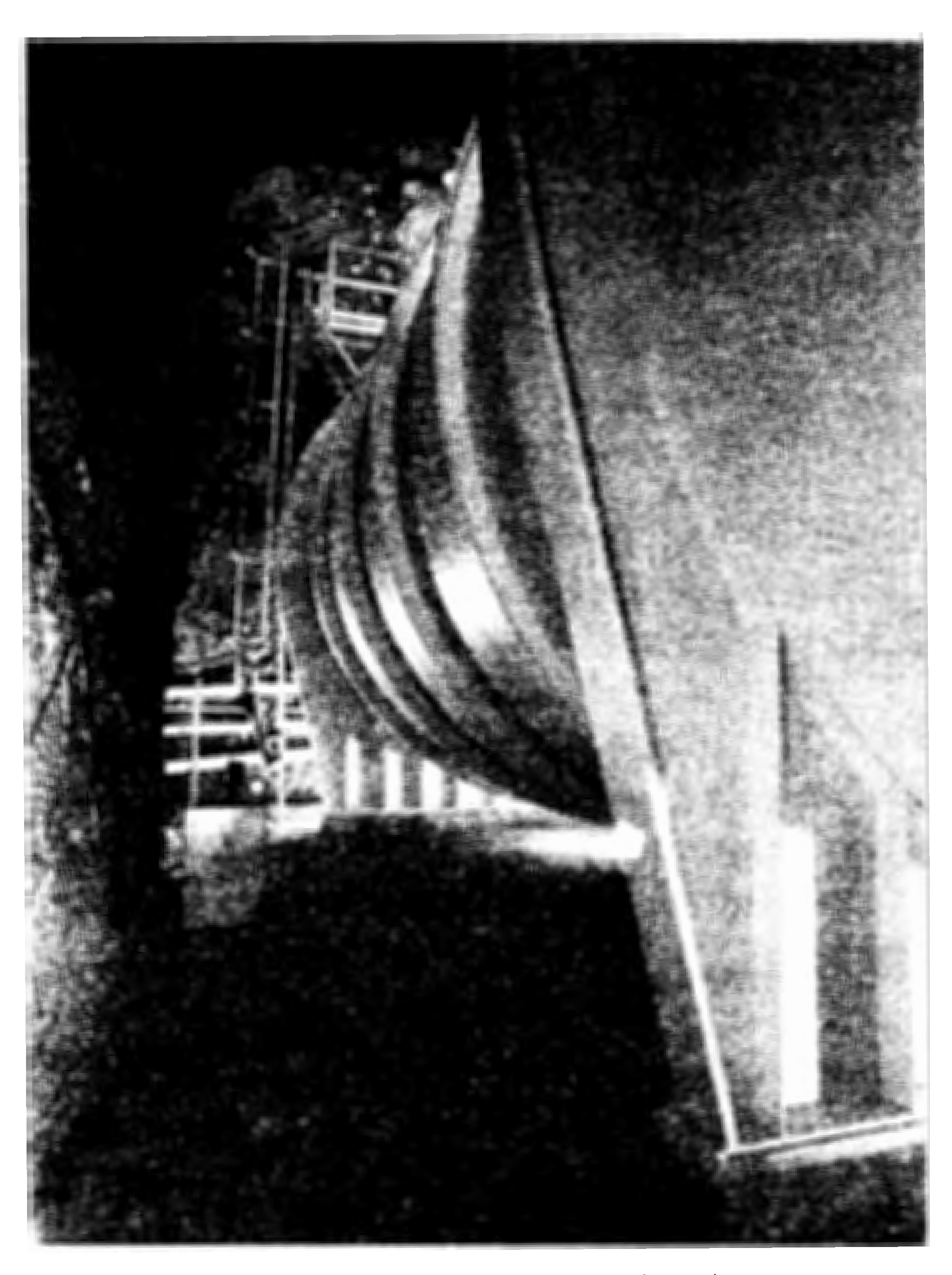
لقد تمَّ البحثُ عن هذه البدائلِ كلِّها خلالَ العقديْنِ ونصفِ العقدِ الماضية، ولكنْ لم يتمّ الحصولُ علىٰ أيِّ تفسيرٍ مقنع. وقد ابتُدِئَ العملُ، في الوقتِ ذاته، في أجيالٍ جديدةٍ مِن بحوثِ النيوترينو الشمسيّ. ومِن هذه التجاربِ واحدةٌ تَمَّ إجراؤها في كاميوكاندي في اليابان، وهي تقومُ بالبحثِ عن النيوترينواتِ التي تُشتّتُها الإلكترونات. وتملكُ تجربةُ كاميوكاندي ماءً مُنَقًّى فوقَ العادة، وبكميةٍ تبلغُ ٦٨٠ طُنّاً، ويعملُ هذا عَمَلَ الكاشف. وتعطينا نتائجُ هذه التجربةِ ما يقرُبُ مِن نصفِ عددِ النيوترينواتِ المتوقّعِ صدورُه مِن الشمس. وهناك تجربةٌ أكثرُ حساسيةً يتمُّ إجراؤها، وهي تُعرَفُ باسمِ سوپر ـ كاميوكاندي، وهي يُنتَظَرُ أن تمدَّنا بمعطَياتٍ إضافية.

وهناك كاشفانِ يستخدمانِ مادّةَ الغاليوم gallium، وهما يُعرَفانِ بالحروفِ الأولىٰ مِن اسمَيْهِما، وهما SAGE و GALLEX. وقد ابتدأتْ نتائجُهما بالظهورِ منذُ عامِ ١٩٩١ ـ ١٩٩٢. وهنا أيضاً فإنَّ دَفقَ النيوترينواتِ الشمسيةِ هو أدنىٰ بكثيرٍ مِن قيمتِه المتوقعة، إذ هو يتراوحُ ما بين ٤٠ و٦٠٪.

وتقعُ النيوترينواتُ التي نبحثُ عنها، بالكاشفاتِ المختلفة، في مَدَياتِ طاقةٍ مختلفة. وهناك شكوكٌ إحصائيةٌ في تلك التجاربِ كلِّها، إضافةً إلىٰ أخطاءٍ في التجربة. وعلىٰ أيةِ حالٍ، وحتىٰ لو حَسَبْنا حِسابَ هذه، فإنَّ التضاربَ يبقىٰ خطيراً.

وهكذا تُرمىٰ الكرةُ مرَّةً ثانية في ملعبِ العلماءِ النظريينَ، وخصوصاً علماءَ فيزياءِ الجسيمات، والذين لا يزالونَ يحاولونَ أن يخرجوا بمخطَّطٍ موحَّدٍ يتوافقُ مع النيوترينواتِ بأصنافِها المختلفة. وقد يُصبِحُ في إمكانِنا أن نفهم التناقضَ المذكورَ ونشرحَه، بعد أن نكونَ قد فهمْنا، وبصورةٍ صحيحةٍ، كُنْهَ النيوترينوات.

ولقد صارَ في حوزتِنا، منذ ثمانيناتِ القرنِ العشرين، مَسْبارٌ probe آخَرُ مفيدٌ لأعماقِ الشمس، وهو جاءنا مِن حقلِ **علم الشمسِ الزِّلزاليّ** helioseismology. وقد نشأَ هذا الموضوعُ استناداً إلىٰ الدراساتِ الدقيقةِ التي تَمَّ إجراؤُها علىٰ اضطراباتِ السطحِ



الشكل خ ـ ١ : تتألفُ تجربةُ كاشفِ النيوترينو، التي ابتدعَها ر . ديڤز، عميقاً تحت الماء، مِن خزّانٍ عظيمٍ لسائلِ الپيركلور إيثلين ($C_2 Cl_4$)، ويتمُّ تعريضُ هذا إلىٰ النيوترينواتِ القادمةِ من الشمس. تتَفاعلُ النيوترينواتُ مع نواةِ الكلورِ في المحلول، فتتحوّلُ إلىٰ أرغون argon، وهذا الأخيرُ هو مِمّا يمكنُ الكشفُ عنه. وهكذا، ومِن خلالِ قياسِ نَوىٰ الأرغونِ، يمكنُنا تقديرُ دَفقِ النيوترينو «الصورةُ بموافقةِ من ر . ديڤز الابن، مختبرُ بروكهاڤن الوطنيّ».

الشمسي. ولقد لوحِظَتْ فعلاً، منذُ ستيناتِ القرنِ العشرين، اضطراباتٌ دَوريّةٌ كلَّ خمسِ دقائقَ، في بُقَعٍ تغطّي نصفَ سطحِ الشمس. وقد تبيَّنَ أنّ هذه الاضطراباتِ التي تُعرَفُ بـ «ذبذباتِ الخَمسِ دقائق» Five - minute oscillations إنما هي قِمّةُ الجبلِ الجليدي! وللشمسِ أيضاً ذبذباتٌ زلزاليةٌ ذاتُ فتراتٍ أطولَ بكثيرٍ (٢٠ ـ ٦٠ دقيقة، ١٦٠ دقيقة، إلخ).

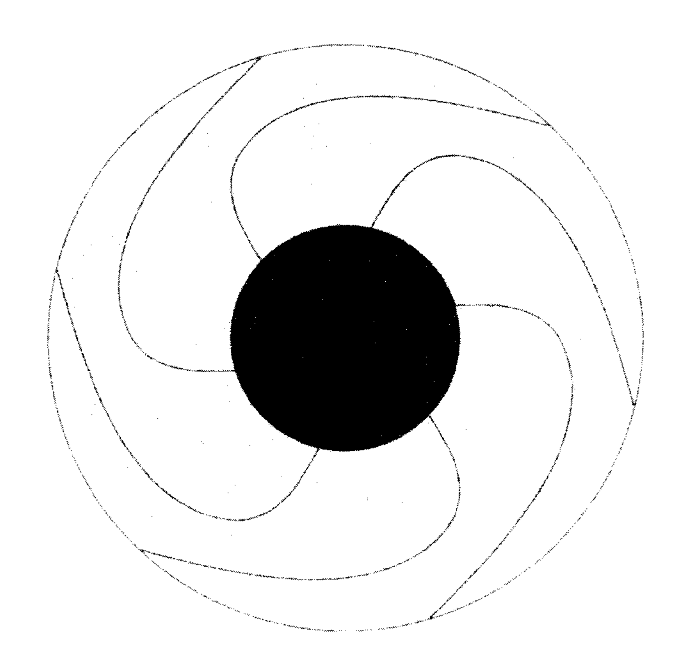
وتنشأُ هذهِ التذبذباتُ عن التقلّباتِ الداخليةِ في الشمس. ويمكنُ للمرءِ، إذا ما ابتدأَ بأنموذجٍ شمسيٍّ، أن يستنتجَ نوعَ الذبذبةِ التي يتوقّعُ رؤيتَها، ثم يقارنَها بما يراهُ فعلاً. ويمكنُنا أن نتفحّصَ، أو نُغيّرَ، أو نؤكدَ فرْضياتِنا بهذهِ الطريقة. وهكذا نجدُ بأنّ اللّفَ الخارجيَّ external spin لسطحِ الشمس (والذي يشبهُ لفَّ الأرضِ حولَ محورِها القطبيّ) يمتدُّ داخِلَها، ولكنه لا يزيدُ، عندَ التوغّلِ في أعماقِ الشمسِ، بالسرعةِ التي كان يتوقّعُها بعضُ العلماء. كما أنَّ تركيزَ الهيليوم في داخلِ الشمسِ هو أعلىٰ مِن أن يناسبَ متطلّباتِ العلماءِ الذين يرغبونَ في إيجادِ حلٍّ لمعضلةِ النيوترينو الشمسيِّ التي وصفناها تَوّاً.

وهكذا، وبسببِ هذه الفوائدِ التي نجنيها مِن فهمِنا لأعماقِ الشمس، فلقد أصبحَ عِلمُ الشمسِ الزلزاليُّ حقلاً مهماً في دراسةِ الفيزياءِ الشمسية.

تكوّنُ النجومِ والكواكبِ السّيارة

رغمَ أننا قُمنا بوصفِ كيفيةِ تكوّنِ النجومِ ونشوءِ الكواكبِ السيارة حولَها، فإن ذلك لم يكن أكثرَ مِن وصفٍ عامّ. وهكذا فلقد بقيَتْ أمورٌ عديدةٌ نحتاجُ إلىٰ استجلائها. إذ ما هو، مثلاً، دورُ الحقلِ المغناطيسيِّ في هذهِ الصورةِ، واضعينَ في نظرِ الاعتبارِ أنَّ النجومَ والكواكبَ السيارةَ تملكُ حقولاً مغناطيسيةً، فعلاً؟ لقد أعطىٰ هانيز آلڤين، وفريد هويْل، تقريراً معقولاً عن الكيفيةِ التي يلعبُ بها الحقلُ المغناطيسيُّ دوراً في نقلِ الزَّخَمِ الزاويِّ angular momentum بالاتجاهِ خارجَ الشمسِ والكواكبِ السيارة. إنَّ خطوطَ القوةِ المغناطيسيةِ التي تربطُ الجزءَ المركزيّ مِن السحابةِ المتقلّصةِ بالأجزاءِ الخارجيةِ مِن القرصِ الكواكبيِّ الأوليّ تنحو إلىٰ إبطاءِ السابقِ، وجعلِ اللاحقِ يلفُّ حولَ نفسِه بصورةٍ أسرع (انظرْ الشكل خ ـ ٢). وهذا هو السببُ في أنَّ الشمسَ ذاتَها تلفُّ حولَ نفسِها spins بصورةٍ بطيئةٍ، بينما تملكُ الكواكبُ السيارةُ سُرَعاً أكبرَ بكثيرٍ للدورانِ حول الشمس، عمّا لو كان الأمرُ سيحدثُ بطريقةٍ أخرىٰ.

ولا يزالُ هناكَ المزيدُ مِن الأسئلة. إذ إنَّ الكواكبَ السيارةَ لا تلفُّ كلُّها علىٰ نفسِها،



الشكل خ ـ ٢: حقولُ القوةِ المغناطيسية الواصلةِ بين سحابةٍ آخِذَةٍ بالانكماش (والتي تصيرُ نجماً)، وبين الأجزاءِ الخارجيةِ مِن القرصِ الكواكبيِّ الأوليِّ protoplanetary disc. وتصيرُ هذهِ الخيوطُ ملتويةً كلَّما زادتْ سرعةُ الجزءِ المركزيّ. ويولِّدُ هذا طوقاً يسحبُ الجزءَ المركزيَّ إلىٰ الخلف ويُبطِئُ مِن حركتِه، كما أنه يجعلُ القرصَ يلفُّ، في الوقتِ ذاتِه، بصورةٍ أسرع.

بالشكلِ ذاتِه، عند دورانِها حولَ الشمس. فالمرِّيخُ Venus، مثلاً، يلفُّ حول نفسِه بعكسِ اتجاهِ لفِّ بقيةِ الكواكبِ السيارة تقريباً، بينما أنَّ مِحْوَرَ لفِّ أورانوس Uranus حولَ نفسِه عموديٌّ تقريباً علىٰ اتجاه دَوَرانِه rotation حولَ الشمس. فَلِمَ ذاك؟ وعَلامَ يَدُلُّ حِزامُ الكويكباتِ asteroidal belt الذي يقعُ ما بين المرّيخِ Mars والمشتري Jupiter[1]؟ هل إنها بقايا متناثرةٌ لكوكبٍ سيّارٍ متحطِّم؟ أم إنها كِسَرٌ وقِطَعٌ لم يكنْ لها أن ترتبطَ ببعضِها البعضِ لتكوينِ كوكبٍ سيّار؟ لقد اقتُرِحَتْ كِلتا الفكرتان.

---

(١) انظرْ كتاب «أسرار الكون في القرآن»، موضوع «ما بين السماوات والأرض ـ ما هو؟»، للدكتور داود السعدي، دار الحرف العربي، بيروت، ط٢ (ص ١٩٩٩)، ص ٩١ ـ ٩٤. هل إنها بقايا كوكبٍ سيّارٍ قامت قيامتُه؟ ذلك ما لا يعلمه إلاّ خالقُها وحدَه. د. س.

وهناك تساؤلاتٌ أعمقُ عن كواكبَ سيارةٍ حول النجوم النابضة! فكيف تكوّنت؟ نحن نتذكرُ بأنّ النجومَ النابضةَ تَمثِّلُ مرحلةً متأخرةً مِن حياةِ النجم، وهكذا فإنّ سيناريو الكواكبِ السيارة التي تتكوّنُ معَ تكوّنِ النجمِ الجديد لا ينطبقُ هنا.

وأخيراً، فما هو مدىٰ شيوعِ وجودِ منظوماتٍ للكواكبِ السيارة؟ إنّ لهذا السؤالِ أهميةً خاصةً في البحثِ عن مخلوقاتٍ ذكيةٍ خارجِ أرضية، وهو ما سنناقشُه في نهايةِ الكتاب.

طاقةُ الكوازاراتِ والمجرّاتِ الراديوية ونَوىٰ المجرّاتِ الفعالة

لم يكنْ قد أُمِيطَ اللثامُ بعدُ، عن لُغزِ الطاقةِ النجمية، وفي عشريناتِ القرنِ العشرين. ويمكنُنا أن نقولَ الشيءَ ذاتَه، اليومَ، عن الطاقةِ الهائلةِ المتدفقةِ مِن الكوازاراتِ والنَوىٰ الفعالةِ التي تمتلكُها المجرّاتُ والمجرّاتُ الراديوية (انظرْ الفصلَ الخامس). ويُعتَقَدُ بصورةٍ عامّةٍ أنّ مخزونَ الطاقةِ في كلٍّ مِن هذه الحالاتِ يكمنُ في التأثيرِ الجاذبيِّ القويِّ لجسمٍ مُتَراصٍّ جداً، والأنموذجُ المثاليُّ لذلك هو الثقبُ الأسود. ولقد حازَ هذا التفسيرُ علىٰ شعبيةٍ كبيرة، إلاّ أنّ هناكَ متشكّكينَ في مدىٰ قوّتهِ علىٰ التأثير. فلنستمع إلىٰ آراء أولئكَ «القِلّة».

وبادِئَ ذي بدءٍ، فإنَّ فعالياتِ البيئةِ المحيطةِ بالمنطقةِ المركزية لا تُظهِرُ أيَّ دليلٍ علىٰ وجودِ تساقطِ infall للمادة، وهو ما تمسُّ له الحاجةُ لو كان هناك ثقبٌ أسود. ولكنْ علىٰ العكسِ مِن ذلكَ فإنَّ الدلالةَ تشيرُ إلىٰ قذفٍ للمادة.[١]

وإذا ما كانَ هناك ثقبٌ أسود black hole يعملُ في المنطقةِ المركزية، فإنّ كتلتَهُ ستحدِّدُ نصفَ قطره الشوارزجايلدي Schwarzschild radius. وفي ثقبٍ أسودَ ذي كتلةٍ تبلغُ بليونَ مرّةٍ بقَدْرِ كتلةِ الشمس، فلسوف يكونُ نصفُ القطرِ ذاك ثلاثةَ بلايينَ كيلومتر. إنَّ قرصاً متعاظماً يتكونُ بالالتحامِ التدريجيِّ accretion disc سيكونُ نصفُ قطرِه أكبرَ

---

(١) إن الثقب الأسود يفترض فيه أن يجذب المادة فَتَسّاقَطُ عليه، لا أن يقذف المادة قذفاً، وهو ما تشير إليه بعض الدلالات المتوفرة المشار إليها هنا. وسنرى بعد قليل أن العلماء قد صاروا يفكرون الآن، في «فيزياء جديدة»، بأن المادة **تُخلَقُ في هذا المكان** ثم هي تُقذَفُ إلى الخارج قذفاً. فسبحان الله إذ صار العلماء، في أحدث أفكارهم، يعتقدون بأن المادة تُخلَقُ، في الكون، خلقاً، أي أنها تجيء من لا شيء، من العدم، وسبحان الله إذ اضطرتهم الحقائقُ الماثلة التي جبهتْهُم إلى أن يسلّموا بالخالق الذي خَلَق، جلَّ شأنه. د.س.

بألفِ مرّةٍ تقريباً، أي نحواً مِن ثلثِ السنةِ الضوئية. وحتىٰ يتمكّنَ المِرْقابُ telescope مِن **رؤيةِ** قرصٍ كهذا يقعُ علىٰ مسافةِ ثلاثينَ مليونَ سنةٍ ضوئيةٍ، مثلاً، فإنه يحتاجُ إلىٰ استبانةٍ resolution تبلغُ نحواً مِن جزءٍ مِن ألفِ جزءٍ مِن الثانيةِ القوسية. ولكنَّ هذه الدرجةَ مِن وضوحِ التفاصيلِ هي أكبرُ مِن إمكانيةِ أحسنِ المَراقِبِ البصرية، ومِن ضمنِها مِرْقابُ هابلَ الفضائي Hubble Space Telescope (HST). وهكذا فإنّ مزاعمَ رؤيةِ قرصِ التراكمِ التدريجي لا تُشيرُ، في حقيقةِ الأمرِ، إلىٰ قرصِ التراكمِ الذي يعودُ للثقبِ الأسود، ولكنْ إلىٰ قرصٍ أكبرَ بكثير، أو حلقةٍ قد تكونُ محيطةً بالجسمِ المركزيّ كإحاطةِ القرصِ الكواكبيِّ الأوليِّ protoplanetary بالنجم. وهكذا فإنّ الدَليلَ علىٰ وجودِ ثقبٍ أسودَ مركزيٍّ هو دليلٌ تكهنيٌّ ليس أكثر، لأنه مبنيٌّ علىٰ صحّةِ سلسلةٍ مِن الافتراضات.

وتفترضُ حساباتُ كيفيةِ استحصالِ الطاقةِ مِن الثقبِ الأسودِ، وتحويلِها إلىٰ إشعاع، وجودَ أفضلِ كفاءةٍ ممكنةٍ لأيةِ عمليةٍ تدخلُ في ذلك. فطاقةُ الثقبِ الأسودِ الجاذبةُ تحتاج، مثلاً، إلىٰ أن تُستخلَصَ وتُستَخْدَمَ لتجهيزِ الطاقةِ للجسيماتِ التي تَفيضُ إلىٰ الخارجِ بتيّارٍ مُسَدَّدٍ بدرجةٍ عالية. ويتوجبُ بعدَ ذلك أن تُحَوَّلَ الطاقةُ الحركيةُ لهذه الجسيماتِ إلىٰ موجاتٍ راديويةٍ وأشكالٍ أخرىٰ مِن الإشعاع. وليس مِن الواضحِ إن كان مِن الممكنِ الحصولُ علىٰ كفاءةٍ عاليةٍ في هذه العمليات، فهذا مِمّا لم يُشاهَدْ في أيِّ مجالٍ آخَرَ في علم الفلك. أما في حالةِ الكفاءةِ efficiency المنخفضة، فإنّ ذلك يرفعُ مِن كتلةِ الثقبِ الأسود، ويجعلُ الأنموذجَ أقلَّ معقولية.

وأمّا بالنسبةِ إلى الأجرامِ ذاتِ التغيُّرِ السريعِ في منتوجِ الطاقةِ، فلا بُدَّ مِن أن يكونَ حجمُها صغيراً. ويتصادم هذاَ الأمرُ المُتَطَلَّبُ مع الحاجةِ التي أشرنا إليها توّاً لوجودِ ثقبٍ أسودَ أكبر في حالةِ وجودِ الكفاءة المنخفضة.

وفي واقعِ الحالِ فإنّ **باديَ الرأيِ** يُشيرُ إلىٰ **قذفٍ** ejection للمادةِ مِن منطقةٍ متراصّةٍ قد تحتوي أو لا تحتوي علىٰ الثقب الأسود. وثمّةَ إمكانيّةٌ، في فيزياءَ «جديدةٍ»، في أنَّ المادّةَ تُخْلَقُ وتُقْذَفُ في هذا المكان.

وبإمكانِنا أن نُعطيَ وصفاً رياضيّاً لكيفيةِ حدوثِ ذلك **مِن دون أيِّ انتهاكٍ لقوانينِ حِفظِ المادةِ والطاقة.**

وتكمنُ المهارةُ هنا في السماحِ بحدوثِ تفاعلٍ أساسيٍّ جديد، وبطاقةٍ سالبةٍ وضغوطٍ سالبة، في المنطقة. وكما وجدْنا في الفصلِ الثاني، فإنَّ الجاذبيةَ ذاتَها تمتلكُ

خاصيّةً للتفاعل مع الطاقةِ السالبة. ويؤدي تفاعلٌ كهذا إلىٰ إيجادٍ وقذفِ متفجّرَيْنِ للمادة مِن المنطقة المتراصّة.

ولسوف نربطُ، بعد قليلٍ، فكرةَ **الانفجارِ الصغيرِ** minibang هذه بعلمِ الكونياتِ وبالعالَمِ المتوسِّع.

لُغْزُ الإزاحةِ الحمراء The redshift puzzle

لقد افترضْنا في كلِّ مكانٍ مِن هذا الكتابِ بأنَّ الإزاحةَ الحمراءَ التي تعودُ لأيةِ مجرّةٍ أو كوازارٍ، أو أيِّ جِرْمٍ يقعُ خارجَ مجرّتِنا، إنما تعودُ إلىٰ توسّعِ العالَم وحَسْب. وقد تكونُ هناك، بالطبع، بالإضافةِ إلىٰ ذلك التوسّعِ، إزاحاتٌ حمراءُ لدوبلرَ Doppler redshifts إضافيةٌ وصغيرةٌ، ناجمةٌ عن الحركاتِ العشوائيةِ للمجرّاتِ أو الكوازاراتِ في العناقيد clusters، إلاّ أنّ مِن المتوقّعِ أن تكونَ هذه الإزاحاتُ صغيرةً، وأنّ جُلَّ الإزاحةِ الحمراءِ ذو مصدرٍ كونيّ. ولسوف نُطلِقُ علىٰ قولِنا هذا تعبيرَ الفرْضيةِ الكونية cosmological hypothesis (وبالاختصارِ ف.ك أو CH).

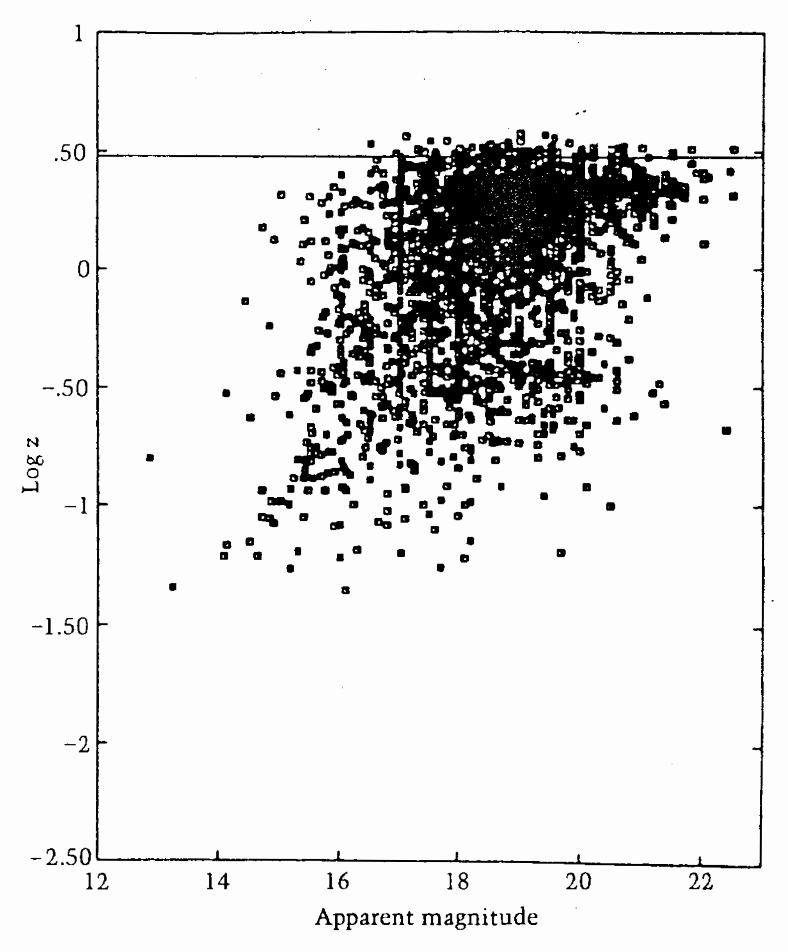
علىٰ أنّه قد تجمّعتْ، خلالَ العقودِ الثلاثةِ المنصرمةِ، أدلّةٌ توحي بوجودِ شيءٍ ما مغلوطٍ في هذه الفرْضية. ورغمَ أنَّ الفرْضيةَ الكونيةَ تبدو، بالنسبة إلى المجرّاتِ، ذاتَ أساسٍ مكين، إلاّ أنَّ الشكوكَ راودَتْ بعضَ الفلكيينَ في انطباقِها علىٰ الكوازارات.

ولقد ابتدأت الشكوكُ تحومُ في حقيقةِ المصدرِ الكونيِّ للإزاحةِ الحمراء التي تخصُّ الكوزاراتِ، في أوائلِ سبعيناتِ القرنِ العشرين، وكان ذلك ناجماً أولاً عن إدراكِنا أنه لا توجدُ في الكوزاراتِ، وعلىٰ عكسِ المجرّاتِ، علاقةٌ واضحةٌ تدلُّ علىٰ أنّ الكوازاراتِ ذاتِ الإزاحاتِ الحمراءِ الأكبرِ هي أبهتُ مِن غيرِها. وهناك تبعثرٌ في المعطياتِ أكبرُ بكثيرٍ مِن أن يكشفَ عن أيِّ علاقةٍ كعلاقةِ هابل. وفي الحقيقةِ، فإنّ مِن العسيرِ أن نتصوّرَ أنْ قد كان في إمكانِ هابلَ أن يتوصّلَ إلىٰ علاقةٍ للسرعةِ بالمسافةِ، لو هو كانَ اكتشفَ الكوازاراتِ أولاً. انظرْ الشكل خ ـ ٣، لمخطّطِ هابل عن الكوازارات.

ولقد كان في إمكانِ تشيب آرْب، وهو نفسُه تلميذٌ لهابل، كما أنّه فلكيٌّ متميّزٌ معروف، أن يجدَ المرّةَ بعد المرّةِ، منذُ أواسطِ سبعيناتِ القرنِ العشرين، دلالاتٍ لا تتوافقُ مع قانونِ هابل. ولسوف نذكرُ هنا أمثلةً لثلاثةِ أنواعٍ مِن الأدلة[1].

---

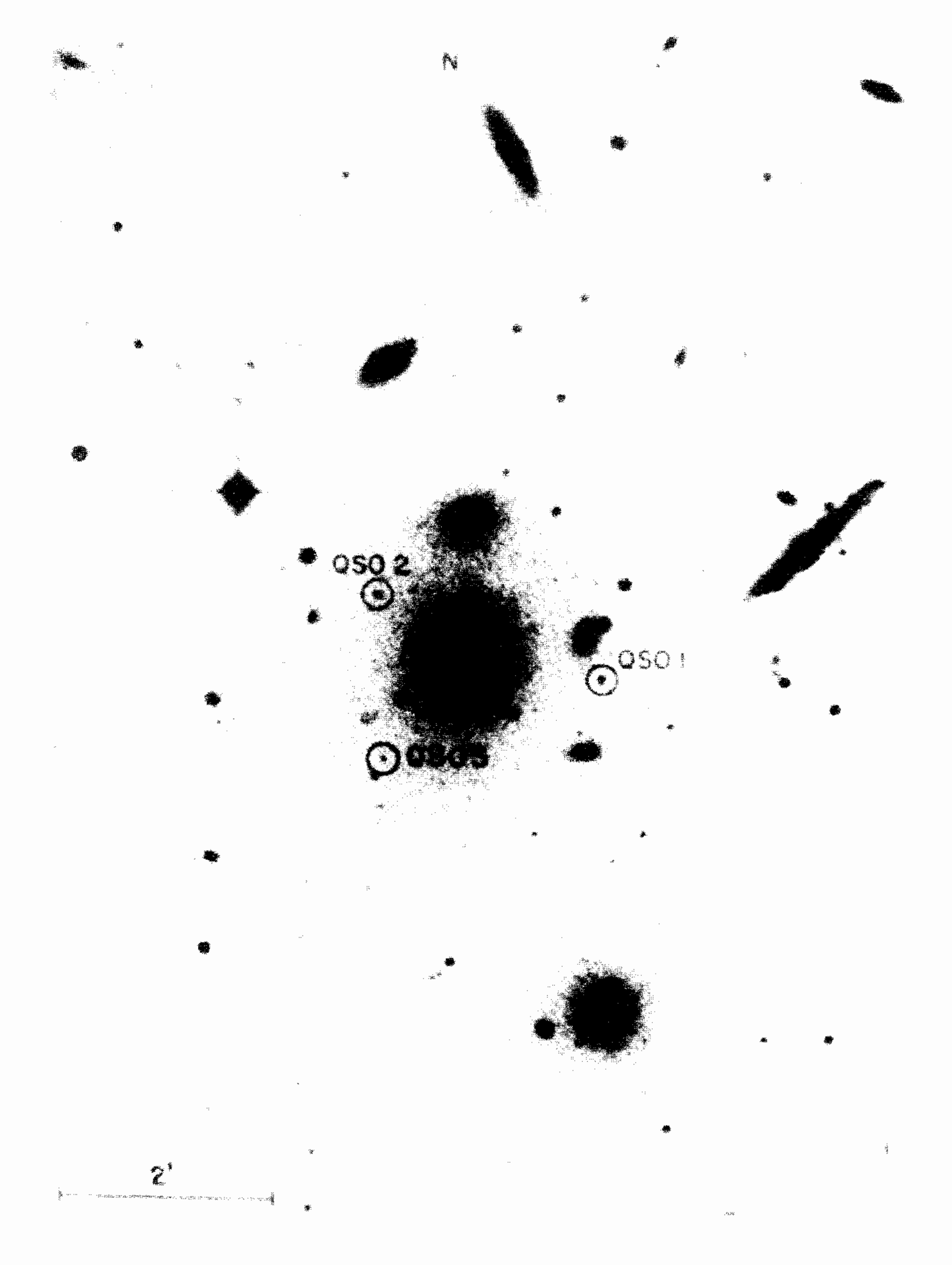
(١) نوصي أولئك المهتمين بالتفاصيل بتقرير آرْب Arp عن مثل هذه الحالات، وهو بالغُ السلاسةِ والتبسيط، في كتابه: Quasars, Redshifts, and Controversies, Berkely, Interstellar media (1987).



الشكل خ ـ ٣: إنَّ مخطَّطَ هابل هذا يُرينا تبعثراً scatter لنحوٍ مِن ٧٠٠٠ كوازارٍ، بأكثر مِن أن يُرِيَنا علاقةً ما بين الإزاحةِ الحمراءِ والمسافة. المحورُ العموديّ: لوغاريتم الإزاحةِ الحمراء، المحورُ الأفقيّ: المسافة.

ويُرينا الشكل خ ـ ٤ ثلاثةَ كوزاراتٍ، قربَ إحدىٰ المجرّات. هل إنها قريبةٌ فيزياوياً مِن المجرّة، أم إنها بعيدةٌ عنها، في واقعِ الحال، وتصادَفَ أنّها ظهرَت موجودةً باتجاهاتٍ قريبةٍ مِن تلك المجرّة؟ لسوف ندعو هذه الخياراتِ بـ (١) و(٢).

إنّ الكوازاراتِ هي أجرامٌ نادرةٌ نسبياً، وهكذا فإنها لا تشغلُ السماءَ إلاّ بصورةٍ غيرِ كثيفة. ويمكنُنا أن نقدِّرَ مدىٰ احتمالِ أن تكونَ هذه الكوازاراتُ الثلاثةُ قد حدث بأنّها سُلِّطَتْ علىٰ مقربةٍ مِن المجرّةِ بمحضِ المصادفة. وهذا الاحتمالُ هو أقلُّ مِن واحدٍ في المليون. وبعبارةٍ أخرىٰ، فإنَّ هذا الحدثَ نادرٌ جدّاً بقَدْرِ نُدرةِ أن تحصلَ مِن خلالِ نَقْرِكَ



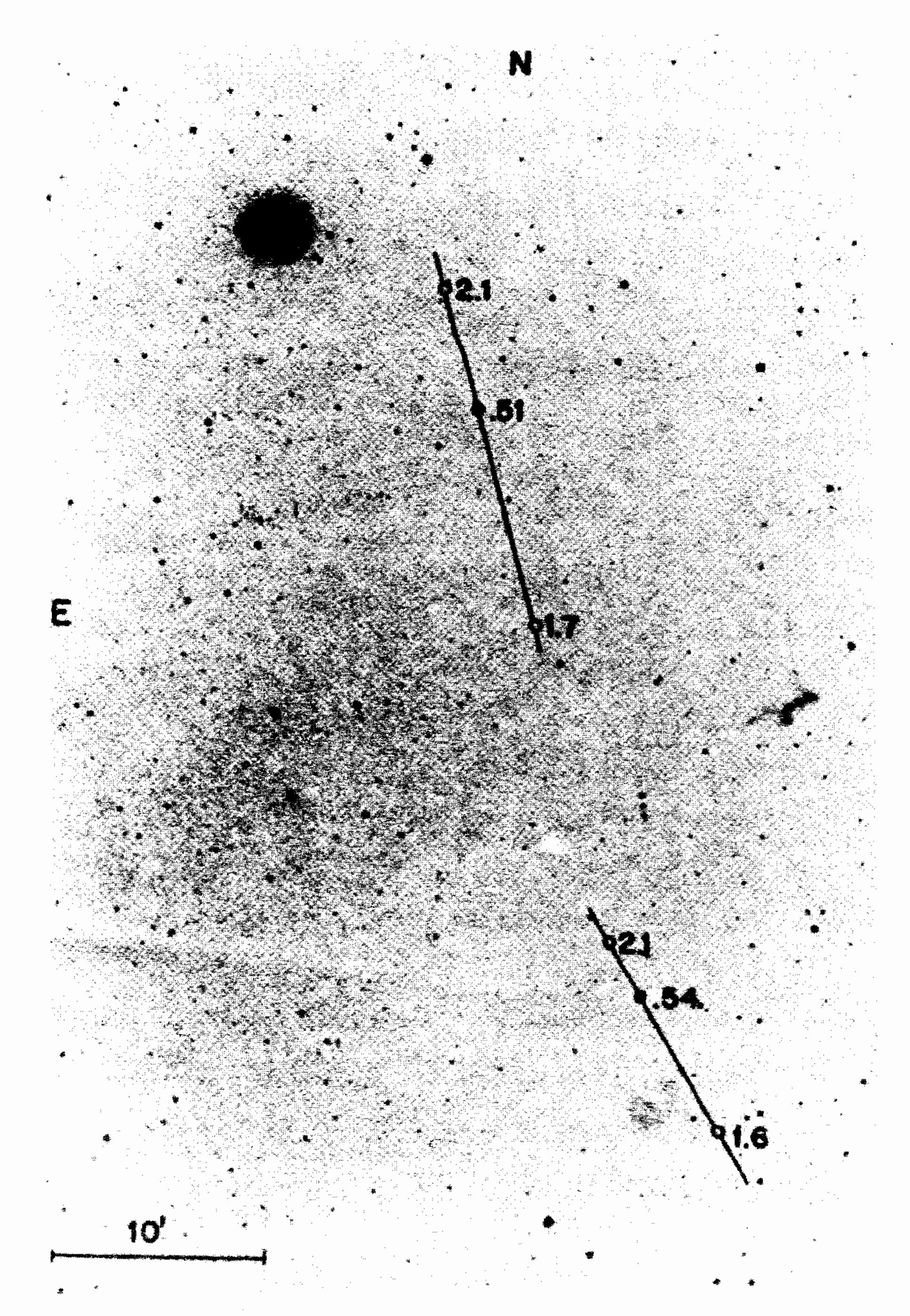
الشكل خ ـ ٤ : ثلاثةُ كوازاراتٍ، قربَ المجرّةِ المسمّاة NGC 3842. إنَّ انفصالاتِها الزاويّةَ مِن المجرّةِ تبلغُ ٧٣ و٥٩ و٧٣ ثانية قوسية. هل إنها تبدو قريبةً مِن المجرّةِ بمحضِ المصادفة؟

للقطعةِ النقديةِ بِظُفرِكَ ورمْيكَ إياها لتحصل علىٰ وجهِها، لا قفاها، إلىٰ أعلىٰ عشرين مرَّةً **متتابعةً علىٰ التوالي**. ويتعيّنُ علىٰ القائم بالإحصاءِ، في حالاتِ احتمالٍ منخفضٍ كهذه، أن يستنتجَ بأنَّ الخيارَ الثانيَ غيرُ محتَمَلٍ، وأنّ الكوازاراتِ تترافقُ، فيزياوياً، مع المجرّة.

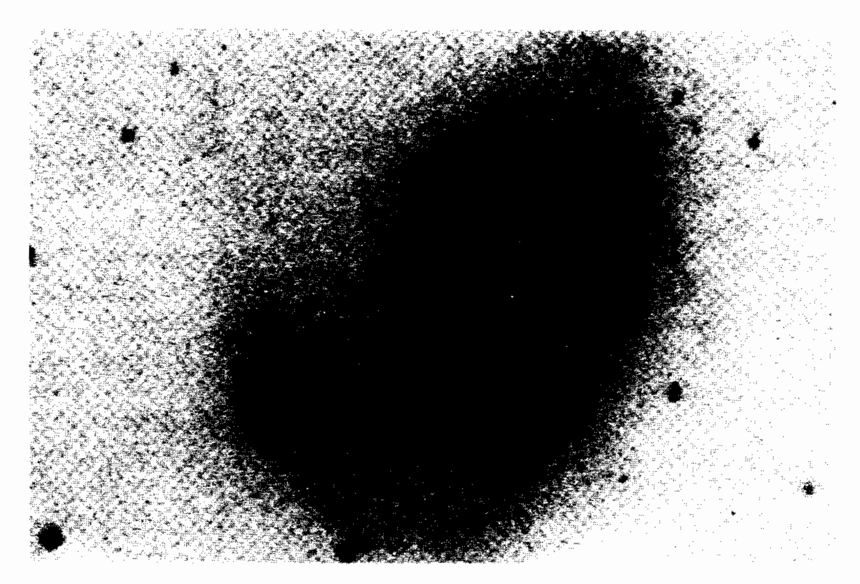
ولكنَّ الخيارَ (١) يتصادمُ مع قانونِ هابل الذي ينصُّ علىٰ أنّ الإزاحاتِ الحمراءَ تعتمدُ علىٰ المسافةِ وحدها. إنَّ لدينا هاهُنا مجرّةً تنخفضُ إزاحتُها الحمراءُ حتىٰ لِتَصِلَ إلىٰ ٠,٠٢ وحَسْب، وهي تترافقُ مادّياً مع كوازاراتِ ذاتِ إزاحاتٍ للأحمرِ مِن ٠,٣٤ و٠,٩٥ و٢,٢٠، فهل إنَّ ذلك يعني بأنّ معظمَ الإزاحةِ الحمراءِ لكلِّ كوازارٍ لا تعودُ إلىٰ توسّعِ العالَم؟ وهل إنَّ لها مكوِّناً داخلياً إضافياً؟

يُرينا الشكل خ ـ ٥ ثُلاثِيَّتَيْنِ اثنتيْنِ مِن الكوازاراتِ بإزاحاتٍ حمراءَ مختلِفات، ولكنَّ كلَّ ثلاثيةٍ منها مُصْطَفَّةٌ جيداً. وقد وُجِدَتْ كلتا الثلاثيتيْنِ علىٰ اللوحِ التصويريِّ ذاته. إنَّ احتمالَ أن يحدثَ ذلك بمحضِ المصادفةِ ضعيفٌ جداً، كاحتمالِ أن تحصلَ علىٰ ١٢ وجهاً للعملةِ المعدنيةِ، علىٰ التوالي، عند رميها (واحتمالاتُ أن لا يحدثَ ذلك هي ٤٠٠٠ إلىٰ ١). وأمّا احتمالاتُ أن تجيءَ منظومةٌ كهذهِ، من طريقِ المصادفةِ، فهي أكبرُ حتّىٰ مِن ذلك، وذلك إذا ما لاحظْنا توافُقَ الإزاحاتِ الحمراءِ للكوازاراتِ الثلاثةِ في الثلاثيتيْنِ، إذ يتوافقُ طاقما نهايةِ الإزاحةِ الحمراءِ مثلما يتوافقُ المركزيُّ منها. ويُتَوَقَّعُ، في العادةِ، أن تكونَ المنظوماتُ المتراصفةُ جيداً مترافقةً مادّياً. ولنتذكّرْ بأنَّ لدينا فصوصاً راديويةً مُصطفَّةً عَبْرَ مجرّةٍ مركزيةٍ في مصدرٍ راديويّ. ويمكنُنا أن نتصوّرَ، بالمِثل، بأنّ تراصُفَ الكوازاراتِ تماماً إنما هو بسببِ عمليةٍ للقذف. وقد يكونُ الكوازارُ المركزيُّ في كلِّ ثلاثيةٍ، مثلاً، قد قَذَفَ الاثنينِ الآخَرَيْنِ باتجاهيْنِ متعاكسيْن. وقد تكونُ الإزاحاتُ الحمراءُ عندها ناتجةً عن تأثيرٍ لدوبلر ناجمٍ عن القذفِ الموضعيّ.

وأخيراً، فإننا نرىٰ في الشكل خ ـ ٦، حالةً يبدو فيها أنّ مجرّتيْنِ اثنتيْن، مختلفتيْنِ في إزاحتِهما الحمراء، ترتبطانِ بخيطٍ سميك. وتملكُ المجرّةُ الكبيرةُ إزاحةً حمراءَ مِن ٠,٠٢٩، بينما تمتلكُ الصغيرةُ في أسفلِ يسارِ الصورةِ، إزاحةً حمراءَ مِن ٠,٠٥٧، ولو افترضْنا بأنَّ هذا الارتباطَ حقيقيٌّ، فإنَّ السرعةَ الشعاعيةَ النسبيةَ relative radial velocity للمجرّةِ الأصغرِ ستبلغُ حينئذٍ نحواً مِن ٨٣٠٠ كيلومترٍ في الثانية. وهذا الرقمُ هو أعلىٰ مِن أن يمكن تفسيرُه باعتبارِه حركةً نسبيةً عشوائية. وهكذا، وحتىٰ نحافظَ علىٰ قانونِ هابلَ حيّاً في هذه الحالة، فإنَّ علينا أن نفترضَ بأنَّ المجرتيْنِ **ليستا متصلتيْن**، وأنّ



الشكل خ ـ ٥: ثلاثيَّتانِ لكوازاراتٍ متراصفةٍ بصورةٍ جيدةٍ جداً، وبإزاحاتٍ حمراواتٍ مختلفات، وكما هو مُؤشَّر. وإذا كان قانونُ هابل صحيحاً، فإنَّ هذه التراصفاتِ يتوجّبُ أن تكونَ جميعُها ناتجةً عن المصادفةِ المحضة.



الشكل خ ـ ٦ : المجرّةُ الكبيرةُ المسمّاةُ NGC 7603، مع مجرّةٍ مرافقةٍ (أسفلَ يسار)، وهي تتصلُ بها ظاهرياً بخيطٍ رفيع. وللاثنتيْنِ إزاحتانِ للأحمرِ مختلفتان، والفرقُ بينهما أكبرُ مِن أن يُمكن تفسيرُه.

المجرّةَ الأصغرَ منهما قد تصادفَ تسَلّطُ ضوئِها في نهايةِ الخيطِ الخارجِ مِن المجرّةِ الكبيرةِ بالضبط!

ويتوجّبُ علينا في هذه الحالاتِ كلِّها أن نوجدَ تصوُّراتٍ مستنبَطةً لتفسيرِ ما نراه. ولقد كانت هناك محاولاتٌ لتفسيرِ هذه الترافقاتِ لأجرام ذاتِ إزاحاتٍ حمراءَ مختلفاتٍ، علىٰ أنّها أمثلةٌ علىٰ العَدْسِ الجاذبيِّ، ولكنّ هذه التفسيراتِ ليست بالمقنعةِ كثيراً.

ولقد عرفنا أيضاً، في الفصلِ السادس، التفسيراتِ التي قدّمَها العلماءُ للحركاتِ فوق الضوئيةِ superluminal motions والظاهرةِ في الكوازاراتِ. وقد كنّا أشرْنا إلىٰ أنه لا وجودَ لحركةٍ فوق ضوئية إذا كانت الكوازاراتُ في واقعِ الحالِ أقربَ ممّا يتطلبُه قانونُ هابل.

فهل إنّ مثلَ هذه الحالاتِ هي أمثلةٌ علىٰ مصادفةٍ نادرةٍ جداً، وكما يمكنُ أن يجعلَنا قانونُ هابل نعتقد، أم إنّ فيها إشارةً إلىٰ حاجتِنا إلىٰ فكرةٍ فيزياويةٍ ما جديدةٍ حتىٰ نفهمَ هذه الشذوذات؟ ودَعْنِي أؤَكّدُ، مرّةً أخرىٰ، علىٰ أنّ موقفَ أغلبِ العلماءِ مِن ظواهرَ شاذّةٍ كهذه كان إهمالَها وليس سَبْرَ أغوارِها.

هل كان هناك مِن انفجار كبير؟

لقد نشأتْ فكرةُ الانفجارِ الكبير مِن خلالِ التقديرِ الاستقرائيِّ لأحوالِ الماضي السحيقةِ مِن توسُّعِ العالَم الملاحَظِ حاليّاً، باستخدام النظريةِ العامّةِ للنسبيةِ لآينشتاين. وكدليلٍ علىٰ الحدثِ الابتدائيّ، فإنَّ المرءَ لَيَذْكُرُ خلفيةَ الأمواجِ الدقيقة microwave background الملاحظةَ حاليّاً، وكثرةَ وجودِ نَوىٰ بعضِ الذراتِ الخفيفة، والتي لا يمكنُ تفسيرُها بلغةِ الصنعِ النوويّ nucleosynthesis في النجوم. ولكنْ، وعلىٰ الرغم مِن هذهِ النقاطِ الإيجابية، فقد يتبيّنُ بأنّ فكرةَ الانفجارِ الكبيرِ قد لا تكونُ صحيحة. وهناك أسبابٌ عديدةٌ تدعونا إلىٰ هذا الرأي اللاأدريّ.

وأولُ هذه الأمورِ أنّ فكرةَ الانفجارِ الكبيرِ ذاتَها، أي حِقبةَ الفردانية الزمنية time singularity فكرةٌ تستعصي علىٰ أيةِ دراسةٍ ماديةٍ فيزياوية. ولقد أصبحَت كثافةُ ودرجةُ حرارةِ المادةِ والإشعاع، في هذه الحِقبةِ، غيرَ محدودةٍ «لانهائية» infinite، وانكمشَت الأحجامُ كلُّها إلىٰ الصفر، وصارت الخصائصُ الهندسيةُ للزّمْكانِ غيرَ محدَّدة undefined. وهكذا فلقد اكتسبَ الانفجارُ الكبيرُ هالةً مِن الرّوحانية أو الصوفيّة mystical aura لا نظيرَ لها في النظريةِ العلمية. وفي الأحوالِ الاعتياديةِ، فإنّه إذا ما أدّت نظريةٌ فيزياويةٌ ما إلىٰ لانهائياتٍ أو أصفارٍ غيرِ مرغوبةٍ للكمياتِ الفيزياوية، فإن الشكوكَ تحومُ حولَها وتُجرىٰ محاولاتٌ لتحسينِها حتىٰ يتمَّ التخلّصُ مِن العناصرِ غير المرغوبةِ في تلك النظرية. وهكذا فإنَّ مِن الضروريِّ أن تكونَ لدينا نسخةٌ منقَّحةٌ مِن نظريةِ آينشتاينَ تتجنبُ معضلةَ الفردانية singularity. وإذا أمكنَ إحداثُ اندماجٍ بينَ نظريتَيْ الكمِّ quantum theory، والنسبيةِ العامة، فقد يكونُ في إمكانِ هذه النظريةِ أن تتخلصَ، فعلاً، مِن معضلة الانفجارِ الكبير.

وإذا ما افترضْنا بأننا قد أبقيْنا الفيزياءَ محدَّدَةً بحقبةِ ما بعدَ الانفجارِ الكبير، فلسوف يصيرُ في إمكانِنا حسابُ عمرِ الكون. وقد تبيَّنَ أنه يقعُ في حدودِ ٨ ـ ١٢ بليونَ سنةٍ، بالنسبةِ إلىٰ أنموذجِ آينشتاين ـ ديسيتر، آخذينَ بعينِ الاعتبارِ الشّكَّ الموجودَ الآنَ حولَ قيمةِ ثابتِ هابل الحقيقية. ولكنَّ ثمّةَ تعارفاً كبيراً بين هذه القيمةِ والأعمارِ التي قُدِّرَتْ لبعضٍ مِن أقدمِ نجومِ المجرّةِ، والتي تقعُ في مدىٰ ١٣ ـ ١٧ بليونَ سنة، إذْ كيف يمكنُ أن يكونَ العالَمُ أصغرَ عمراً مِن محتوياته؟ إنَّ أعمارَ نماذجِ النوعِ الثاني مِن العالَم type II models، أي «الكونِ المغلَقِ» closed universe، هي حتىٰ أقصرُ مِن ذلك. وهناك

محالاوتٌ تجري، في الوقتِ الحاضر، لحلِّ هذه المعضلةِ، من طريقِ الاستشهادِ بنماذجَ مِن النوعِ الثالث type III models، أي في الكون المفتوح، ذاتِ كثافةٍ منخفضة. ولكنَّ هناكَ مشكلةً تحولُ دونَ ذلك وتتمثّلُ هنا في وجود عوائق دونَها نشأتْ عن مُشاهَداتٍ أخرىٰ.

ومن هذه العوائقِ وفرةُ عنصره الديوتيريوم deuterium في الكون (وهو نظيرٌ isotope للهايدروجين يُعرَفُ غالباً باسم «الهايدروجينِ الثقيل» heavy hydrogen)، والتقلباتُ الملحوظةُ في خلفيةِ الأشعةِ الدقيقةِ مِن قِبَلِ القمرِ الصناعيِّ المستكشِفِ للخلفيةِ الكونية «COBE»، والمستكشفاتِ الأخرىٰ، والمشاهداتُ الفعليةُ للبنىٰ الكونيةِ الضخمة (المجرّات galaxies، والعناقيد clusters، والعناقيدِ الضخمةِ superclusters، والفجواتِ voids)، ووجودُ مجرّاتٍ كاملةِ التكوين في إزاحاتٍ حمراءَ عاليةٍ، مع كثرةِ وجود العناقيدِ الغنية rich clusters (أي تلك العناقيدِ المأهولةِ بكثافةٍ أكبر). ولسوف يحتاجُ الأمرُ منّا إلىٰ تفاصيلَ تقنيّةٍ لا يتسعُ المجالُ لذكرها في وصفِ وتقييم هذهِ العوائق. علىٰ أنّ بإمكاننا أن نقولَ بأنَّ الخبراءَ يتفقونَ الآنَ، وبصورةٍ عامةٍ، علىٰ أنَّ هذهِ العوائقَ والتحديداتِ قد جعلتْ مِن الضروريِّ إدخالَ مؤشّراتٍ parameters جديدةٍ إلىٰ صورةِ الانفجارِ الكبير. ومِن هذه المؤشّراتِ **الثابتُ الكونيّ** cosmological constant.

وقد تمَّ إدخالُ هذا الثابتِ، إلىٰ النسبيةِ العامة، عامَ ١٩١٧، مِن قِبَلِ آينشتاين، لأنه احتاجَ إلىٰ قوّةٍ كونيةٍ تقومُ بموازنةِ الجاذبيةِ، وبغرضِ الحصولِ علىٰ أنموذجٍ مستقرٍّ static للكون (انظرْ الفصلَ السابع). ولقد حدَّدَ الثابتُ الكونيُّ، بالضرورةِ، مقدارَ هذه القوةِ الطاردةِ بين أيِّ مجرّتيْنِ مفصولتيْنِ بمسافةٍ محدّدة. ثمَّ إنه تخلّىٰ عنه، باعتباره شيئاً غيرَ ضروريٍّ، حالَما تمَّ التأكدُ مِن أنَّ الكونَ ليس مستقرّاً ولكنه آخِذٌ في التوسّع. وقد تمَّ إحياءُ هذا الثابتِ، في الوقت الحاضر، لدعم سيناريو الانفجارِ الكبير. وبدلاً مِن أن نقومَ بممارسةٍ مُرَقَّعَةٍ، أو كَشْكولٍ، كهذا، فلقد يكونُ الوقتُ حانَ لإعادةِ تقويمِ الأدلّة، والتفكيرِ في مقاربةٍ مختلفةٍ تماماً. ومِن هذه الأفكارِ التي تتمُّ مناقشتُها، في الوقتِ الحاضر، فكرةُ علم كونياتِ الحالةِ شبهِ المستقرّة quasisteady - state cosmology (QSSC)، والتي اقترحَها فريد هويْل، وجيوفري بيربج، والمؤلِّف، عامَ ١٩٩٣.

وفي علمِ الكونياتِ هذا، فإنَّ خَلْقَ المادةِ في العالَم لا يُحالُ إلىٰ حَدَثٍ غامضٍ مثل الانفجارِ الكبير، ولكنه جزءٌ مِن نظريةِ حقلٍ واسعِ المَعالم. وإذا ما أردْنا أن نبتعدَ عن

الأوجهِ التقنيةِ لهذا الموضوع، فقد يمكنُنا أن نقولَ بأنَّ توسّعَ العالَم في علم كونياتِ الحالةِ شبهِ المستقرة (QSSC) يُسَيِّرُهُ توزيعٌ لمراكزَ موضعيةٍ للخَلْق، أو **انفجاراتٌ مصغَرَة** minibangs. وتقعُ هذه حولَ أجرام ضخمةٍ متراصّةٍ جداً، والتي هي قريبةٌ مِن حالةِ الثقوبِ السوداء، ولكنها ليست ثقوباً سوداءَ في حقيقةِ الأمر. وتساعدُ جاذبيةُ هذهِ الأجرامِ القويةِ على تصنيعِ المادة. وليس ذلك وحدَه، إذ إنَّ الحقلَ الذي يعملُ باعتباره وساطةً لصنعِ المادة، يقذفُها بقوةٍ عظيمة، وهو ما يؤدي إلى وضعٍ متفجّر. إنَّ ظواهِرَ مِثْلَ الكوازاراتِ، والنَّوى الفعّالة للمجرّاتِ والمصادرِ الراديوية، قدْ تحصلُ على الطاقةِ التي تحتاجُ إليها مِن خلالِ هذه العملية.

وفي علمِ الكونياتِ فإنّ تأثيرَ هذه العمليات هو أن يجعلَ العالَم يتوسّع. ولكنَّ فعاليّةَ الخَلْقِ قد لا تكونُ ثابتةً، إذ قد تزيدُ وتهبط، وهو ما يؤدي إلى تقلّباتٍ في توسّعِ العالَم المستقرِّ والمُطَّرِد. وكما يظهرُ في الشكل خ ٧، فإنَّ التوسّعَ شِبهُ مُطَّرِدٍ، مع فتراتٍ متناوبةٍ مِن التوسّعِ والانكماشِ، كالتقلباتِ الحاصلةِ في اقتصادٍ ما آخِذٍ في النموّ. والعالَمُ ذاتُه ليست له بدايةٌ، ولا نهايةٌ، ولا انفجارٌ كبيرٌ، ولا سَحْقٌ كبير no big crunch و no big bang، بل إنه مستمرٌّ إلى الأبد، وهو في مَنجاةٍ مِن معضلةِ الفَرْدانية[1].

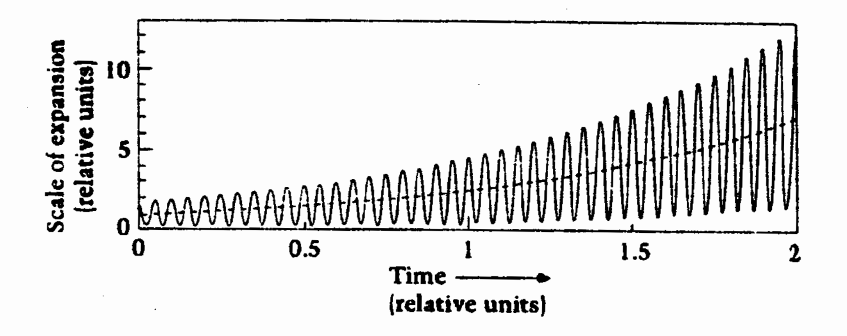
وبالطبع، فإنَّ علمَ كونياتٍ كهذا لا يعاني مِن مشكلةِ العمر. فالنجومُ الطاعنةُ في السنِّ، والنجومُ الصغيرةُ جداً يمكنُ أن توجدَ معاً مِن دونِ تسبيبِ أيِّ تعقيدٍ أو إرباك!

وتسمّى الجسيماتُ المتكونةُ في الانفجاراتِ المصغرّةِ **بجسيماتِ بلانك** Planck particles. وتحدّدُ كُتَلَ هذهِ الجسيماتِ ثلاثةُ ثوابتَ أساسيةٍ، وهي: سرعةُ الضوء، وثابتُ بلانك، والثابتُ النيوتنيُّ للجاذبية. وتَنْتُجُ مِن ذلك النَّوى الخفيفةُ، لأنَّ نواتجَ انحلالِ جسيمةِ بلانك، وكمياتِها، وكما يتبيّنُ بحسابِ كونياتِ الحالةِ شبهِ المستقرّةِ «QSSC»، تتوافقُ مع النواتجِ الملاحَظَةِ، فعلاً، وبصورةٍ ممتازة.

ويُفَسَّرُ وجودُ خلفيةِ الموجاتِ الدقيقةِ «المايكرو ويف» باعتبارهِ الضوءَ المتبقّي مِن قِبَلِ النجوم في دوراتها السابقة. ويتنبأُ هذا الأنموذجُ بدرجةِ حرارةِ الخلفيةِ الحاليةِ بصورةٍ صحيحة.

---

(١) الفَرْدانية Singulartiy: إذا انضغطَ قَدْرٌ مِن المادةِ، بسبب الجاذبية، إلى ما هو نقطةٌ رياضياً، فإنَّ هذه النقطةَ مِن الكثافةِ اللامتناهيةِ هي ما تكونه الفردانية. وأغلبُ الظّنِّ أنَّ الفردانياتِ لا توجدُ في الطبيعة، كما أنَّ مِن المحتملِ أنَّ الظواهرَ الكميّةَ سوف تؤكّدُ بأنَّ كثافةَ المادةِ لا تصبحُ، في واقع الحال، كثافةً متناهيةً أبداً. أفَوُجِدَ، إذاً، من العدم؟ ألا تبّاً له مِن خَرَص. د.س



الشكل خ ـ ٧: يُرينا هذا الشكلُ تغايُرَ مقياسِ التوسّع منسوباً إلىٰ الوقت في علم كونياتِ الحالةِ شبهِ المستقرّة «QSSC». ويبيّنُ المنحنىٰ المنقّطُ التوسّعَ المطّرِدَ والتذبذباتُ مُرَكّبَةٌ فوقَه (الخطُّ المستمرّ).

كيف يمكنُنا أن نفرّقَ بينَ علمِ كونياتٍ كهذا وعلمِ كونياتِ الانفجارِ الكبير؟

ليس هناك إلاّ فحوصٌ حاسمةٌ معدودة. فإذا كنّا ننظُرُ، مَثَلاً، إلىٰ بعضِ المصادرِ في الحقبةِ الماضيةِ مِن «QSSC»، عندما كانت دورةُ الذبذبةِ السابقةِ قريبةً مِن توسّعِها الأقصىٰ، فإنَّ هذهِ المصادرَ يتوجّبُ أن تكون مائلةً (مُزاحةً) إلىٰ الأزرق blueshifted. أي يتوجّبُ أن تبدوَ الخطوطُ الموجودة في أطيافٍ ذاتِ ترددّاتٍ زائدة، مُقارَنةً مع القِيَم المختبرية. والعثورُ علىٰ حالاتٍ كهذه ليس بالأمرِ اليسير، لأنَّ المصادرَ التي نحنُ بصددِها سوف تكونُ غايةً في البعدِ، وباهتةً جداً. وعلىٰ أيةِ حالٍ، فلسوف يكون مِن المستحيل تفسيرُ دليلٍ مِن هذا القبيل، في علمِ كونياتٍ نموذجيٍّ لانفجارٍ كبير standard big bang cosmology.

وهناك دلالةٌ أخرىٰ يتوجّبُ البحثُ عنها، وهي تتمثلُ في النجوم ذاتِ الكُتَلِ المنخفضةِ التي أصبحتْ حمراءَ توّاً. فالنجومُ التي تصلُ كتلُها إلىٰ نصفِ كتلةِ الشمسِ، مثلاً، سوف تحترقُ ببطءٍ شديد، وهي تحتاجُ إلىٰ أربعينَ أو خمسينَ بليونَ سنةٍ حتىٰ تتعملق. ولسوف نجدُ في كونياتِ الحالةِ شبهِ المستقرةِ «QSSC» نجوماً كهذه وُلِدَتْ في الدورةِ السابقة. أمّا في علمِ كونياتِ الانفجارِ الكبيرِ فإنها لا يمكنُ مُلاءَمتُها.

ولا تتطلّبُ الـ «QSSC» أن تُصنَعَ المادةُ المظلمةُ مِن جسيماتٍ خفيةٍ مِثلِ الجسيماتِ الضخمةِ ضعيفةِ التفاعلِ البينيّ weakly interacting massive particles (WIMPs). وإذا ما تبيّنَ أنَّ المادةَ المظلمةَ تتألفُ، في معظمِها، مِن جسيماتٍ اعتياديةٍ (أي باريونيةٍ baryonic) فلسوف تكونُ تلكَ نقطةً ضدَّ نظريةِ الانفجارِ الكبير.

تكوينُ البِنىٰ الواسعة

مهما كان نوعُ الأنموذجِ الكونيّ الذي نختارُه، فلا بدَّ له أن يفسّرَ وجودَ وتراتبيةَ hierarchy البِنيةِ الكونيةِ بالمقاييسِ الكبيرةِ التي بسطْناها في الفصلِ السابع. وقد أصبحَ هذا السؤالُ، في علمِ كونياتِ الانفجارِ الكبيرِ، في الوقت الحاضر، وبالفعلِ، مَحَطَّ اهتمامِ العلماء ومركزَه. فهل قد تكونت البِنيةُ الكونيةُ بتراتُبٍ هرميٍّ صاعد upward hierarchical sequence (سيناريو مِن القاعدةِ إلىٰ القمّة)، حيث تجيءُ المجراتُ أولاً، ثم هي تصيرُ عناقيدَ clusters، ثمَّ تتشكّلُ في عناقيدَ ضخمةِ superclusters؟ أم إنَّ العكسَ مِن ذلك هو الذي يحدث (سيناريو مِن القمّةِ إلىٰ القعر)؟ وكم نحتاجُ مِن المادةِ المظلمةِ غيرِ الباريونيةِ لتكوينِ البِنىٰ الملاحظةِ؟ هل إنها «حارّة» hot أم «باردة» cold؟[1] هل إنَّ توزيعَ المادةِ السوداءِ يشابهُ توزيعَ المادةِ المرئية؟ هل قد لعبَ الثابتُ الكونيُّ cosmological constant دوراً في السيناريو كلِّه؟

إنَّ العلماءَ يقومون باختبارِ هذه التنوعاتِ أو الأشكالِ المختلفةِ كلّها، والشيءُ الأساسيُّ فيها هو أنَّ الجاذبيةَ تلعبُ دوراً أساسياً في تكوينِ البِنىٰ. ويكمنُ البرهانُ علىٰ محتوىٰ البِنيةِ في تواؤمِها مع المُعطَياتِ التي نراها اليومَ، للمجرّاتِ والإشعاعِ معاً. ويُشيرُ عَدَمُ ظهورِ أيِّ منافِسٍ ناجحٍ لهذه النظريةِ علىٰ مدىٰ تعقيدِ هذه المعضلة الشائكة.

أو أنها قد تكونُ مؤشّراً علىٰ أنَّ الفكرة الأساسيةَ فيها غيرُ كافيةٍ أو مغلوطةٌ. وعلىٰ سبيلِ المثالِ، فإنَّ دُعاةَ «QSSC» يضعونَ بيضَهم في سلةِ الانفجارِ المُصَغَّرِ minibang، مُجادلينَ بأنَّ البِنىٰ تنشأُ وتتكوّنُ عَبْرَ خَلْقٍ متفجّرٍ للمادةِ حولَ أجرامٍ عظيمةٍ متراصّة.

وقد تساعدُ الدراساتُ المبنيةُ علىٰ المشاهَداتِ لخلفيةِ الموجاتِ الدقيقة «المايكرو ويف» والبِنىٰ الكبيرةِ، في المستقبلِ، علىٰ جسمِ الأمرِ، بتوفيرِ تفاصيلَ إضافية. ثمَّ إنها، وبالطبع، قد تجعلُ حياةَ العلماءِ النظريينَ أكثرَ صعوبة!

---

(١) إنَّ المادةَ السوداءَ الحارّة hot dark matter (HDM)، والمادةَ السوداءَ الباردة cold dark matter (CDM) هي اصطلاحاتٌ تقنيةٌ تمكّننا مِن التمييزِ بين سُرعاتِ جُسيماتِ المادةِ السوداءِ، في مراحلِ تكوينِ البِنيةِ الأولىٰ. لقد كانت الجسيماتُ الحارّةُ (HDM) تتحركُ بسرعةٍ، وأمّا الجُسيماتُ الباردةُ (CDM) فقد كانت تتحركُ ببطء.

البحثُ عن مخلوقاتٍ ذكيةٍ خارجَ أرضية
The search for extraterrestrial intelligence [SETI]

لقد احتفظْنا بأمرٍ، هو غايةٌ في الإثارة، خارجَ نطاقِ الأعاجيبِ السبعِ التي بحثْناها. ويَحارُ الأشخاصُ العاديّونَ في الجوابِ علىٰ السؤال: «هل إننا موجودونَ وحدَنا في العالم؟» مثلما يَحارُ به العلماء. ولمّا كانت مجرّتُنا تحتوي علىٰ نحوِ مِن مائةِ بليونِ نجم يشبهُ الشمس، وقد يمتلكُ الكثيرُ منها كواكبَ سيارةً، فإنَّ هذا السؤالَ يكتسبُ أهميةً حقيقية. إنَّ كتابَنا عن الكونِ لسوف يكونُ ناقصاً إذا لم نتطرّقْ إلى مشروعِ البحثِ عن مخلوقاتٍ ذكيةٍ خارج أرضية (مشروع سيتي SETI).

ولقد سَبَقَ أن أشرْنا، في الفصلِ السادس، إلىٰ السُّحُبِ الجزيئية molecular clouds. لقد أفلحَت البحوثُ الفلكيةُ التي تَمّ إجراؤُها علىٰ الموجاتِ ذاتِ المليمترِ الواحدِ طولاً، في التعرّفِ علىٰ جزئياتٍ عضويةٍ معقّدة، وهي توجدُ لها أشباهٌ في أنماطِ الحياةِ علىٰ سطحِ الأرض (ومِن ضمنِها نحنُ البشر). وهكذا فإنَّ هناك احتمالاً يتأرجحُ باستمرارٍ بين الإثباتِ والنفي، في وجودِ أشكالٍ للحياةِ في أمكنةٍ أخرىٰ مِن الكون مبنيّاً علىٰ تلك الأجزاءِ التي هي أشبهُ بقِطَعِ أحاجي الصُّوَرِ المقطّعَة. ولمّا كانت الحياةُ تحتاجُ إلىٰ الطاقة والبيئة المناسبةِ، فإنَّ ما نتوقّعُهُ هو أن تنشأَ الحياةُ في كوكبٍ سيّارٍ مناسبٍ دائرٍ حول نجمٍ ما، ويعملُ هذا الأخيرُ باعتبارِه مصدراً للطاقة.

وهناك متشكّكونَ بالطبع. فنحنُ لا نعرفُ، مثلاً، كيف ابتدأَت الحياةُ علىٰ سطحِ الأرض. ثم، ما هي احتمالاتُ نشوئِها في مكانٍ آخر؟ وهل إنّ هذه الاحتمالاتِ كبيرةً بما يكفي حتىٰ تضمنَ، بدرجةٍ أو بأخرىٰ، وجودَ منظومةٍ حيّةٍ أخرىٰ في مكانٍ آخَرَ مِن الكون؟ يعتقدُ المتشككونَ أنْ لا، وهم يريدون أن يعتقدوا بأننا موجودونَ في الكونِ وحدَنا بالفعل.

وثمّةَ، غير أولئكَ، مَن يفضّلون المقاربةَ التجريبيةَ للبحثِ علىٰ المناقشاتِ النظريةِ حول إمكانيةِ وجودِ حياةٍ خارجَ الأرض. إنَّ تقنياتِنا الحاليةَ، قد مكّنتْنا، بالكاد، مِن استلامِ الإشاراتِ الراديوية، هذا إذا كانت هي ما يُتبادَلُ فعلاً بين المخلوقاتِ العاقلةِ الخارجَ أرضية. ومِن المعتقَدِ أنّ أكثرَ الأطوالِ الموجيةِ احتمالاً لبثٍّ مِن هذا القبيلِ ما بينَ النجومِ، هو الحزمةُ الموجيّةُ التي تبلغُ ٢١ سنتيمتراً حولَ الطولِ الموجيِّ للهايدروجينِ المتعادل 21 - centimetre waveband around the neutral hydrogen wavelength

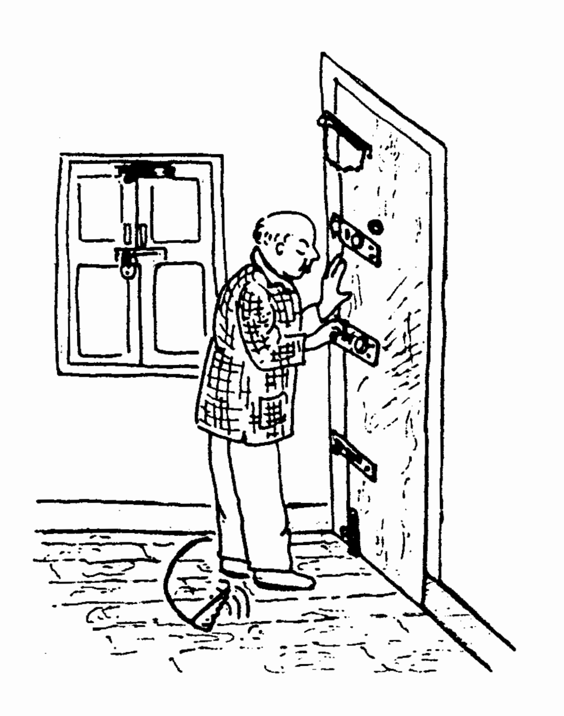
(انظرْ الفصلَ السابع). وتتميَّزُ هذه الحزمةُ الموجيةُ بميزتيْنِ عظيمتيْنِ، إذ إنها توجدُ في كلِّ مكانٍ مِن المجرّةِ، ولا بدَّ أن تكون شيئاً معتاداً بالنسبة إلى جيرانِنا المتطورينَ (والذين سوف يكونونَ قد استنبطوا القواعدَ الفيزياويةَ التي تكمُنُ وراءَها)، ثم إنها الحزمةُ الموجيةُ التي لا يُعاني فيها البثُّ علىٰ هذا الطولِ الموجيِّ مِن كثيرِ توهين.

وهكذا، فإنّ المقاربةَ التجريبية لمشروع «سيتي» تكمنُ في أن ننشرَ هوائياتِنا، ونأملَ في أن تصلَنا إشارةٌ ما مِن مخلوقاتٍ عالية. ثم إننا لو أفلحْنا في اعتراضِ هذهِ الإشارة فلعلّنا أن نبتدئَ محاورتَنا مع المخلوقاتِ الخارجِ أرضية.

وإذا ما كانوا متطوّرينَ فعلاً، فلعلَّهم أن يكونوا قادرينَ علىٰ إطلاعِنا علىٰ أسرارِ الألغازِ التي نبحثُها هنا.

خاتمة

مهما أنبأتْنا تلك المخلوقاتُ التي تعيشُ خارجَ الأرضِ، أو اكتشفنا بأنفسنا، فإنَّ الرسمَ الكاريكاتوريّ الذي يظهرُ في الشكل خ ـ ٨ يؤكدُ لنا بأنَّ علمَ الفلكِ قد تطوّرَ عَبْرَ اللاَّمتوَقَّع. إنَّ الرأيَ الإنسانيَّ المتحيّزَ الذي يقولُ إنَّ أيّما عرفْناهُ في زمننا الراهن لا بدَّ أن



الشكل خ ـ ٨: حتىٰ لو أغلقتَ البابَ بطُرُقٍ مختلفةٍ عديدة، فإنه لا يزالُ في إمكانِ الداخلِ عُنوةً أن يقتحمَه بطريقةٍ غيرِ متوقَّعة!

يكون كافياً حتىٰ نفهمَ أسرارَ الكونِ جميعاً لهوَ شيءٌ ضدُّ الأفكارِ الجديدة. ورغمَ هذه المقاومةِ، فإنَّ هذه الأفكارَ الجديدةَ تقتحمُنا عَنْوةً، وبصورةٍ غيرِ متوقعة. فهاهُنا تكمنُ الإثارةُ لدىٰ أولئك الذين يعملونَ في هذا المضمار. إنَّ الأعاجيبَ غيرَ المتوقعةِ لهيَ أدعىٰ لدهشتِنا مِن الأعاجيبِ المتوقعة.

ولذلك دَعُونا أن لا نتكهَّنَ بما عساها أن تكونَ الأعجوبةُ الثامنة..

المحتويات

فهرس



أعاجيب الكون السبع

كثيراً ما قرأنا عن «عجائب الدنيا السبع» وكثيرة هي الكتب التي أسهبت في الحديث عنها، غير أنّ كتابنا هذا يشكّل نقلة نوعية في الكلام على «أعاجيب الكون السبع»، فإذا كانت العجائب السبع الأولى عجائب أرضية، فإنّ العجائب السبع الثانية تحملنا إلى الكون الشاسع، الكون اللاّمنتهي، إلى حيث يلفُّ الغموض كل شيء.

تناول المؤلف من روائع الخَلْق ما جمعه تحت سبعة عناوين أسماها «أعاجيب» وأسمى كتابه «أعاجيب الكون السبع»، وهو قد غاص في بحر علم الفلك الحديث ثم خرج علينا من درره بحقائق كثيرة قد لا يكون معظمها معروفاً من القرّاء.

هذا الكتاب يطمح إلى إعطائنا لمحات سريعة عن الحقول المثيرة، حالياً، في عِلمَيّ الفَلَكِ والفيزياء الفلكية.

و«الأعاجيبُ» السبعُ الموصوفة هنا ليست مواضيعَ منفصلة عن بعضها البعض، ولكنها تمثل طيفاً من الظواهر المجهولة، أو طائفة من أحداث مثيرة، أو ثلّة من أجرام كونية رائعة وغير عادية. ولقد طرحت محاولات فهم هذه الأجرام تحدياتٍ عظيمة لحُب الاستطلاع والذكاء البشريين.

وإننا لنأمل من خلال هذه الأعاجيب ان يتشاركَ القارئ الشعور بالإثارة، لدى استكشاف الكون، مع علماء الفَلَكِ المتخصِّصين، الذين يرصدون الظواهر الفلكية...

علي مولا



